

**VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ - TECHNICKÁ
UNIVERZITA OSTRAVA**

Hornicko – geologická fakulta

Katedra environmentálního inženýrství

Metody odstraňování dusičnanů z podzemních vod

diplomová práce

Autor:

Bc. Iva Kotalová

Vedoucí diplomové práce:

prof. Dr. Ing. Miroslav Kyncl

Ostrava 2018

VŠB - TECHNICAL UNIVERSITY OF OSTRAVA

Faculty of mining and geology

Department of environmental engineering

Methods of nitrate removal from groundwater

diploma thesis

Author:

Bc. Iva Kotalová

Supervisor:

prof. Dr. Ing. Miroslav Kyncl

Ostrava 2017

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Hornicko-geologická fakulta
Institut environmentálního inženýrství

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Iva Kotalová**
Studijní program: N2102 Nerostné suroviny
Studijní obor: 2102T006 Technologie a hospodaření s vodou
Téma: **Metody odstraňování dusičnanů z podzemních vod**
Methods of nitrate removal from groundwater

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
2. Rešerše k problematice dusičnanů v podzemních vodách
3. Metody odstraňování dusičnanů z vod
4. Charakteristika studované lokality a testovaných metod
5. Metodika testů a analýz
6. Výsledky a diskuse
7. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

Dle pokynů vedoucího diplomové práce.

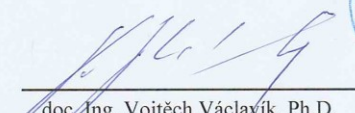
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

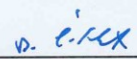
Vedoucí diplomové práce: **prof. Dr. Ing. Miroslav Kyncl**

Datum zadání: 31.10.2017

Datum odevzdání: 30.04.2018




doc. Ing. Vojtěch Václavík, Ph.D.
vedoucí institutu


doc. Ing. Jan Valíček, Ph.D.
děkan fakulty

- Celou diplomovou práci včetně příloh, jsem vypracovala samostatně a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.
- Byla jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména § 35 – využití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a využití díla školního a § 60 – školní dílo.
- Beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně, ke své vnitřní potřebě, diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- Souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěném v příloze mé diplomové práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- Souhlasím s tím, že diplomová práce je licencována pod Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 Unported licencí. Pro zobrazení kopie této licence, je možno navštívit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/>
- Bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu o komerční využití z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- Bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu komerčnímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

V Ostravě dne 29. 4. 2018

Bc. Iva Kotalová

Poděkování

Tímto bych chtěla poděkovat panu prof. Dr. Ing. Miroslavu Kynclovi za jeho ochotu a cenné rady a paní Ing. Jitce Chromíkové, PhD., za pomoc při práci v laboratoři. Dále děkuji své rodině a přátelům za jejich podporu v průběhu celého mého studia.

Pro diplomovou práci byla využita přístrojová technika Institutu čistých technologií těžby a užití energetických surovin - Projekt udržitelnosti, identifikační kód LO1406, podporovaného Národním programem udržitelnosti, financovaného ze státního rozpočtu ČR.

Anotace

Diplomová práce je zaměřena na odstraňování dusičnanů z podzemních vod pomocí elektrodialýzy. Teoretická část práce se zabývá obecnou problematikou dusičnanů v podzemních vodách. Dále jsou zde vypsány další metody, které lze k odstraňování dusičnanů také použít. V praktické části jsou elektrodialýze podrobeny tři různé vzorky podzemní vody s nadměrným množstvím dusičnanů. Získané výsledky jsou srovnávány s limitními hodnotami platnými pro pitnou vodu.

Klíčová slova: elektrodialýza, dusičnany, podzemní voda, pitná voda, odsolení.

Summary

This thesis is focused on the removal of nitrates from groundwater by electrodialysis. The theoretical part deals with the general problem of nitrate in groundwater. Also are described further methods which can also be used for the removal of nitrates. In the practical part, electrodialysis is subjected to three different samples of groundwater with excess nitrate. The results are compared with the limits applicable to drinking water.

Key words: electrodialysis, nitrate, groundwater, drinkwater, desalination.

OBSAH

1	ÚVOD.....	1
2	Formy dusíku ve vodách	2
2.1	Amoniakální dusík ve vodách.....	2
2.2	Dusitany ve vodách	3
2.3	Dusičnany ve vodách	3
2.4	Nitrifikace	4
2.5	Problém dusičnanů v podzemních vodách v České republice	4
2.6	Problém dusičnanů v podzemních vodách ve světě	8
3	Metody pro odstraňování dusičnanů	10
3.1	Iontová výměna.....	10
3.2	Reverzní osmóza	12
3.3	Elektrodialýza	14
3.4	Biologická denitrifikace	17
3.5	Elektrokoagulace.....	18
4	Charakteristika studovaných lokalit a testovaných metod.....	19
4.1	Vybrané lokality.....	19
4.2	Vstupní analýza.....	20
4.3	Elektrodialyzační jednotka.....	21
5	Metodika testů a analýz.....	24
5.1	Vstupní analýza.....	25

5.2	ED testy	28
5.2.1	Nová Bělá	28
5.2.2	Krásné Pole – Předvrší.....	33
5.2.3	Krásné Pole Branecká.....	37
6	Výsledky a diskuze.....	42
6.1	Vyhodnocení vzorku Nová Bělá	42
6.2	Vyhodnocení vzorku Krásné Pole Předvrší	45
6.3	Vyhodnocení vzorku Krásné Pole Branecká.....	48
7	Závěr	52

1 ÚVOD

Voda je jednou ze základních složek životního prostředí. Pokrývá až dvě třetiny zemského povrchu. Z toho vyplývá, že bez vody by život na Zemi nebyl možný. Bohužel, v dnešní době je voda často znečišťována. Mezi hlavní zdroje znečišťování patří bezesporu zemědělství a rozvoj průmyslu. Se zemědělstvím souvisí zejména zvýšená koncentrace dusíkatých látek ve vodách jako následek nadměrného využívání dusíkatých hnojiv.

Existuje celá řada metod, díky kterým lze dusíkaté látky z vod odstranit. Můžeme zmínit např. iontovou výměnu, biologickou denitrifikaci, reverzní osmózu a další. V současné době se do popředí dostávají tzv. membránové procesy. Každá z použitých metod má určité výhody a nevýhody, které je nutné před použitím dané metody zvážit. Membránové procesy mají oproti jiným metodám řadu výhod. Jedná se zejména o vysoký stupeň vyčištění vody a malou náročnost na množství použitých chemikálií.

Teoretická část této práce se zabývá problémem dusíkatých látek v podzemních vodách u nás i ve světě. Jsou zde zmíněny některé legislativní nástroje, které souvisí s problematikou obsahu dusíkatých látek v podzemních vodách a dále požadavky, které jsou kladeny na pitnou vodu a různé druhy vod balených. Jsou zde také sepsány další metody, které lze využívat při odstraňování dusíkatých látek z vod.

Pro experimentální část této práce jsou vybrány tři lokality s nadlimitním množstvím dusičnanů v podzemních vodách. Cílem práce je provést odstranění dusičnanů z těchto vod s použitím procesu elektrodialýzy.

Výsledné hodnoty jsou srovnávány s limitními hodnotami platnými pro pitnou vodu dle vyhlášky č. 252/2004 Sb., Dále je vypočtena účinnost procesu s ohledem na různé vstupní objemy.

2 FORMY DUSÍKU VE VODÁCH

Dusík patří mezi biogenní prvky, je to tedy prvek důležitý pro rozvoj organismů. Ve vodách dusík nabývá několika oxidačních stupňů, mohou být anorganického nebo organického původu. Dusíkaté sloučeniny ve vodách vznikají zejména rozkladem organických látek. [1,2]

Ve vodách se stanovuje celkový dusík, který je dán součtem koncentrace dusíku anorganického a organického.

$$N_{celkový} = N_{anorganický} + N_{organický}$$

Koncentrace amoniakálního, dusičnanového a dusitanového dusíku se celkově vyjadřuje jako anorganický dusík.

$$N_{anorganický} = N_{NH_4+NH_3} + N_{NO_3} + N_{NO_2}$$

Dusík může ve vodě nabývat několika oxidačních stavů. Nejčastěji se jedná o:

- III amoniakální dusík (NH_4^+ , NH_3), kyanidy (CN^-)
- 0 elementární dusík (N_2)
- +I oxid dusný (N_2O)
- +III dusitanový dusík ($N-NO_2^-$)
- +V dusičnanový dusík ($N-NO_3^-$)

Na životní prostředí mají největší vliv stavy -III, +III a +V. [1, 3]

2.1 Amoniakální dusík ve vodách

Amoniakální dusík se ve vodách přirozeně nevyskytuje. Vzniká především jako produkt rozkladu organických látek živočišného i rostlinného původu. Na vodní organismy působí toxicky. V oxických podmínkách (bez přístupu O_2) je NH_4-N velice nestabilní a snadno podléhá oxidaci na dusitany. [1, 2]

Mezi hlavní antropogenní zdroje znečištění patří dusíkatá hnojiva, splaškové odpadní vody, odpadní vody z živočišných výroby a různých průmyslových odvětví. Jedná se např. o tepelné zpracování uhlí a galvanické pokovování [1]. Podle [3] limitní hodnota pro koncentraci amoniakálního dusíku 0,5 mg/l.

2.2 Dusitany ve vodách

Dusitany neboli dusitanový dusík, se ve vodách vyskytují pouze v malých koncentracích. Díky procesu nitrifikace, jsou za oxických podmínek oxidovány na konečný produkt nitrifikace, dusičnany. Díky jejich snadné oxidaci, jsou hodnoty koncentrace $\text{NH}_2 - \text{N}$ ve vodách velmi proměnlivé a rychle se mění. Z tohoto důvodu je považován tento ukazatel znečištění vod pouze za indikační. Vysokou koncentraci dusitanů vykazují obvykle odpadní vody z některých průmyslových odvětví (povrchová a tepelná úprava kovů). Limitní hodnota koncentrace dusitanů pro pitnou vodu je podle vyhlášky č. 252/2004 Sb. stanovena na 0,5 mg/l. [1, 2, 4]

2.3 Dusičnany ve vodách

Dusičnany jsou konečným produktem nitrifikace. Jsou důležitou složkou pro rostliny, které je využívají pro svůj růst. V povrchových vodách se množství dusičnanů odvíjí od ročního období. Ve vegetačním období je jejich koncentrace menší, naopak na podzim a v zimě, tedy mimo vegetační období, je jejich množství vyšší a může dosahovat až mezních hodnot. [1, 5, 6]

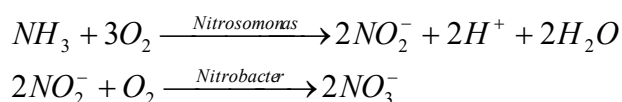
Dusičnany se v malých koncentracích vyskytují ve většině přírodních vod. Ovšem v poslední době je považováno znečištění povrchových a podpovrchových vod dusičnany za velice závažný problém. Pronikání velkého množství dusičnanů do podzemních a povrchových vod je způsobeno nekontrolovaným vypouštěním odpadních vod a také intenzivním používáním organických hnojiv, zejména v zemědělských oblastech [3,8].

Dusičnany sice nejsou pro člověka nijak zdravotně závadné, ale v lidském organismu, hlavně v zažívacím traktu člověka, mohou být redukovány na dusitany NO_2^- , které reagují s hemoglobinem za vzniku methemoglobinu. Methemoglobin, na rozdíl od hemoglobinu, nepřenáší kyslík, proto je zde nebezpečí vzniku methemoglobinemie.

Methemoglobinemie neboli syndrom modrého dítěte, je velice nebezpečná zejména pro kojence. Dusitany mohou být dále přeměněny na karcinogenní nitrosamin, který způsobuje poškození gastrointestinálního traktu [5,7].

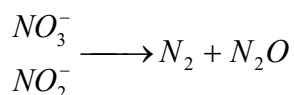
2.4 Nitrifikace

Jedná se o dvoustupňový proces. V prvním stupni je pomocí bakterií *Nitrosomonas* amoniak, získaný degradací organické látky, oxidován na dusitany. Tato část nitrifikace je nazývána Nitritace. V druhé fázi, Nitrataci, jsou pomocí bakterií *Nitrobacter* dusitany oxidovány na dusičnany [1, 3]. Celý proces lze vyjádřit rovnicemi:



Při těchto reakcích je rozpuštěný kyslík obsažen ve vodě spotřebováván, což způsobuje škodlivé účinky na životní prostředí a biotu. Současně s tímto procesem probíhá proces denitrifikace. [3]

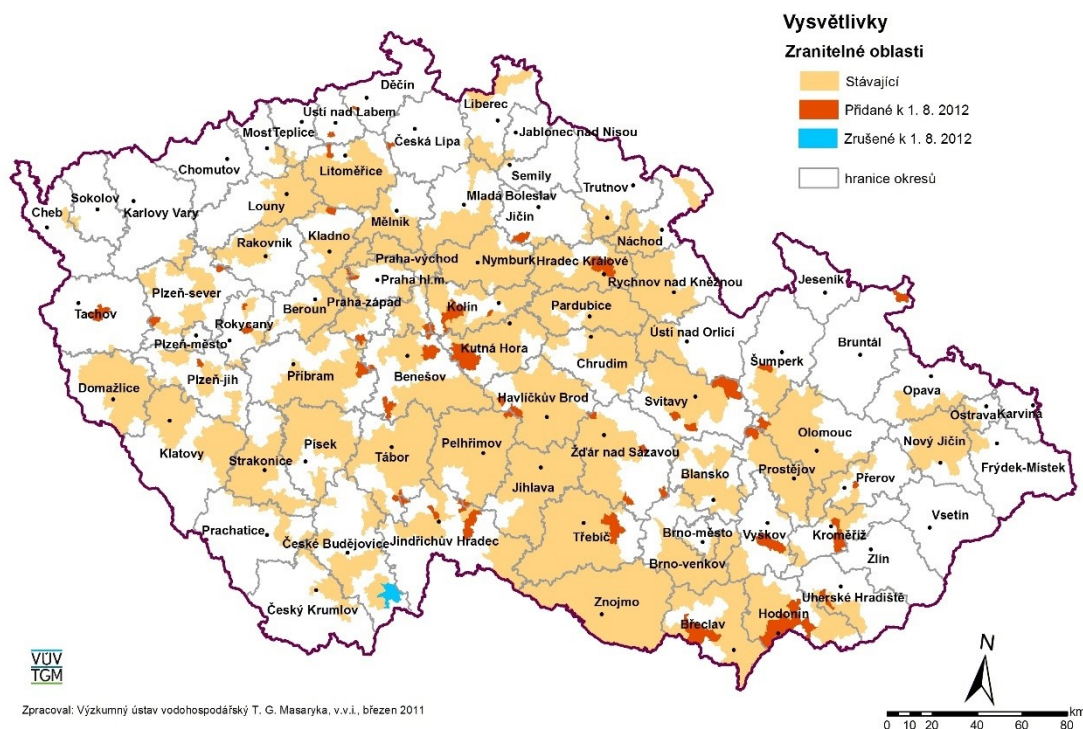
Denitrifikací nazýváme proces přeměny dusičnanových iontů na plynný dusík a oxid dusný. K celému tomuto procesu je zapotřebí přítomnost denitrifikačních bakterií [1]. Denitrifikaci lze zapsat rovnicí:



2.5 Problém dusičnanů v podzemních vodách v České republice

Znečištění vod dusíkatými látkami upravuje v České republice několik legislativních nástrojů. Hlavním je zákon č. 254/2001 Sb., o vodách – vodní zákon. Tento zákon chrání především podzemní a povrchové vody. Součástí tohoto zákona je §33 *Nitrátová směrnice*. Jde o předpis Evropské unie 91/67/EHS, které má za cíl chránit vody před znečištěním dusičnany ze zemědělství. Prováděcím zákonem Nitrátové směrnice je nařízení vlády č. 262/2012 Sb., o stanovení zranitelných oblastí. Zranitelná oblast je takové území, kde je koncentrace dusičnanů v podzemní vodě vlivem zemědělství vyšší než 50 mg/l [9,10,11]. Mapa zranitelných oblastí je na Obrázku 1.

Nové vymezení zranitelných oblastí s účinností od 1. 8. 2012



Obrázek 1: Mapa zranitelných oblastí v ČR k 1. 8. 2012 [10]

Podzemní vody jsou v České republice považovány za hlavní zdroj pitné vody. Jelikož až do roku 2011 neexistoval v naší legislativě žádný nástroj, který by se zabýval kvalitou podzemních vod, byla kvalita těchto vod určována podle vyhlášky č. 252/2004 Sb., o pitné vodě [12].

Teprve v prosinci roku 2011 byla vydána vyhláška č. 5/2011 Sb., o vymezení hydrogeologických rajonů a útvarů podzemních vod, způsobu hodnocení stavu podzemních vod a náležitostech programů zjišťování a hodnocení stavu podzemních vod. Podle této vyhlášky jsou podzemní vody v České republice rozděleny do tzv. útvarů podzemních vod. [12,13]

Tento právní předpis se dále zabývá metodikou hodnocení stavu podzemních vod. Celkové hodnocení stavu těchto vod se skládá z jejich chemického a kvantitativního stavu. Hodnocení chemického i kvantitativního stavu vod se provádí v intervalu jednou za šest

let. Metodiky obou testů jsou popsány v příloze této vyhlášky. Limitní hodnota pro obsah dusičnanů v podzemních vodách je 50 mg/l. [4,12]

Pro určování kvality pitné vody je nejdůležitější vyhláška č. 252/2004 Sb., kterou se stanovují hygienické požadavky na pitnou vodu a četnost a rozsah kontroly pitné vody. Tímto právním předpisem se stanovují mikrobiologické, biologické, fyzikální, chemické i organoleptické ukazatele a jejich hygienické limity, které jsou stanoveny pro pitnou vodu. Dále obsahuje také limitní hodnoty všech ukazatelů, stanovených pro teplou vodu. Vyhláška v neposlední řadě stanovuje rozsah a četnost kontroly dodržení jakosti pitné vody a také požadavky na metody kontroly jakosti pitné vody. [4]

Předpisy, zabývající se požadavky na pitnou vodu uváděly v letech 1959 až 2004 také množství dusičnanů, které bylo vhodné pro kojence přikrmované umělou výživou. Tento limit byl stanoven na 15 mg/l. Z aktuálního právního předpisu bylo toto kritérium vypuštěno s odůvodněním, že aktuálně platný limit 50 mg/l je stanoven také s ohledem na možnost vzniku methemoglobinemie u kojenců. Při úpravě pitné vody je však tento limit stále dodržován. [14]

Koncentrace dusičnanů je monitorována také u balených vod. Platným právním předpisem, který se zabývá touto problematikou je vyhláška č. 275/2004 Sb., o požadavcích na jakost a zdravotní nezávadnost balených vod a o způsobu jejich úpravy. Touto vyhláškou jsou rozlišovány čtyři typy balených vod. Jedná se o balené přírodní minerální vody, balené pramenité vody, balené kojenecké vody a balené pitné vody. Vyhláška také stanovuje mikrobiologické, chemické i fyzikální požadavky, které jsou na všechny balené vody kladeny. Dále se zabývá způsoby jejich úpravy, kontroly a hodnocení. [15]

Balené přírodní minerální vody – vody, získané ze zdroje přírodní minerální vody nebo z přírodního léčivého zdroje, kterému bylo vydáno příslušné osvědčení. Tyto vody lze využívat jako potraviny. Obsah dusičnanů v těchto vodách je stanoven na 50 mg/l. [15]

Balené pramenité vody – vody získané z chráněného podzemního zdroje. Tyto vody mohou trvale využívat děti i dospělí. Nejvyšší obsah dusičnanů je stanoven na 25 mg/l. [15]

Balené kojenecké vody – vody získané z chráněného podzemního zdroje. Vody jsou vhodné k přípravě kojenecké stravy. Jsou vhodné k trvalému využívání také ostatním obyvatelstvem. Obsah dusičnanů může být nejvýš 10 mg/l. [15]

Balené pitné vody – vody, které splňují požadavky na pitnou vodu podle vyhlášky 252/2004 Sb., obsah dusičnanů, tedy nesmí překročit limitní hodnotu 50 mg/l. [15]

Všechny typy vod mohou být podle vyhlášky č. 275/2004 Sb. upravovány pouze určitými metodami. U balených přírodních minerálních vod a balených vod pramenitých se k odstranění volného oxidu uhličitého využívají pouze fyzikální metody. K odstranění nestabilních sloučenin jako jsou sloučeniny železa a síry se využívá filtrace a dekantace. Tyto dvě metody lze využít také při odstraňování arzenu a manganu. K odstranění všech jmenovaných látek se pak využívá vzduch obohacený o ozon. Tato metoda může být ovšem použita pouze v případě, kdy to dovoluje složení vody, v případě, že nedojde ke změně fyzikálně-chemické skladby složek minerálních vod. Dále musí voda splňovat podmínku, že před úpravou jsou splněny limity některých mikrobiologických ukazatelů a při samotném procesu úpravy musí být zajištěna účinnost a bezpečnost celého procesu. [15]

Balená kojenecká voda může být upravována pouze ozářením UV zářením. Podmínky, které musí být při ozařování dodrženy uvádí vyhláška č. 297/1997 Sb., o podmínkách ozařování potravin. Do balených kojeneckých vod nesmí být přidávány další látky, výjimkou je oxid uhličitý. [15]

Vyhláška č. 275/2004 Sb., také stanovuje četnost kontroly jakosti a zdravotní nezávadnosti všech balených vod. U přírodních minerálních vod má povinnost provést kontrolu výrobce, a to minimálně jednou za rok. Výrobce má také povinnost provádět kontrolu denní výroby. Zákon č. 164/2001 stanovuje četnost a rozsah kontroly zdroje. [15]

Kontrola jakosti a zdravotní nezávadnosti u balených pramenitých vod a vod kojeneckých je prováděna výrobcem minimálně pětkrát za kalendářní rok v různém rozsahu stanovených ukazatelů. Rozsah jednotlivých kontrol uvádějí přílohy č. 2 a 3 vyhlášky č. 275/2004 Sb. [15]

2.6 Problém dusičnanů v podzemních vodách ve světě

Znečištění podzemních vod dusičnany je celosvětový problém. Jedná se o Saúdskou Arábii, Indii, Čínu, Japonsko, USA a Velkou Británii a několik dalších oblastí. Podle [3] asi 40 % vody ze studní v povodí Sierra Pelona v Los Angeles v Kalifornii produkuje vodu, která překračuje maximální přípustnou hodnotu $\text{NO}_3\text{-N}$.

K ochraně spotřebitelů před nepříznivými účinky spojenými s vysokým příjmem dusičnanů stanovily Spojené státy, Kanada, Evropské hospodářské společenství (EHS) a Světová zdravotnická organizace (WHO) normy pro regulaci koncentrací dusičnanů v pitné vodě. Limit pro pitnou vodu stanovený EHS (1980) a WHO (1993) pro dusičnany je 50 mg / l. [8,16]

Americká asociace vodních děl (AWWA, 1990) uvedla, že více než 20 % z 5826 vzorků podzemních vod z domácích a zavlažovacích vrtů ve státě Nebraska prokázalo, že koncentrace dusičnanů přesahuje limit stanoven pro USA. Vysoký obsah dusičnanů v pitné vodě je také zaznamenán v několika částech Indie. V okrese Nagpur, Maharashtra používá asi 91 % vesnic podzemní vody jako nejběžnější zdroj vody pro domácí a zemědělské účely. Hodnocení kvality vody v 27 obcích okresu Nagpur ukázalo, že asi 40 % vzorků podzemních vod mělo úroveň dusičnanů mezi 20 a 100 mg, (přibližně 7 % vzorků mělo koncentrace vyšší než 100 mg/l). Kmenová oblast údolí Satpura (severozápadní hranice Maharashtry) nacházející se mezi řekami Narmada a Tapti v centrální Indii, kde je většina lidí, kteří zde žijí domorodá a hlavní činností vykonávaná v této oblasti je zemědělství. Monitorování kvality podzemních vod v roce 2007 ukázalo, že koncentrace dusičnanů v této oblasti je vyšší než ve městě. Stejně je na tom vesnice Challapalli Mandal, nacházející se u břehu řeky Krishna poblíž Bengálského zálivu. [3,8]

Tento problém je aktuální také v Číně. Zhao Tongke [17] zjistil, že průměrný obsah $\text{NO}_3\text{-N}$ ve zdejších podzemních vodách byl stanoven na 111,9 mg/l. V sedmi provinciích na severu Číny (Peking, Hebei, Henan, Shandong, Liaoning, Tianjin a Shanxi) zjištěné hodnoty překračovaly limitní hodnotu stanovenou WHO o 34,1 %.

3 METODY PRO ODSTRAŇOVÁNÍ DUSIČNANŮ

V současné době se dusičnany odstraňují z vody následujícími způsoby: biologická denitrifikace, iontová výměna, reverzní osmóza a elektrodialýza. Nicméně žádný z těchto způsobů není dokonalý. Z tohoto důvodu jsou prováděny pokusy o vývoj a implementaci nových technik (Donanovy dialýzy, katalytické redukce, membránové bioreaktory) nebo úpravy dostupných metod (nové konstrukce příslušného zařízení nebo nových typů membrán). [3,7,8]

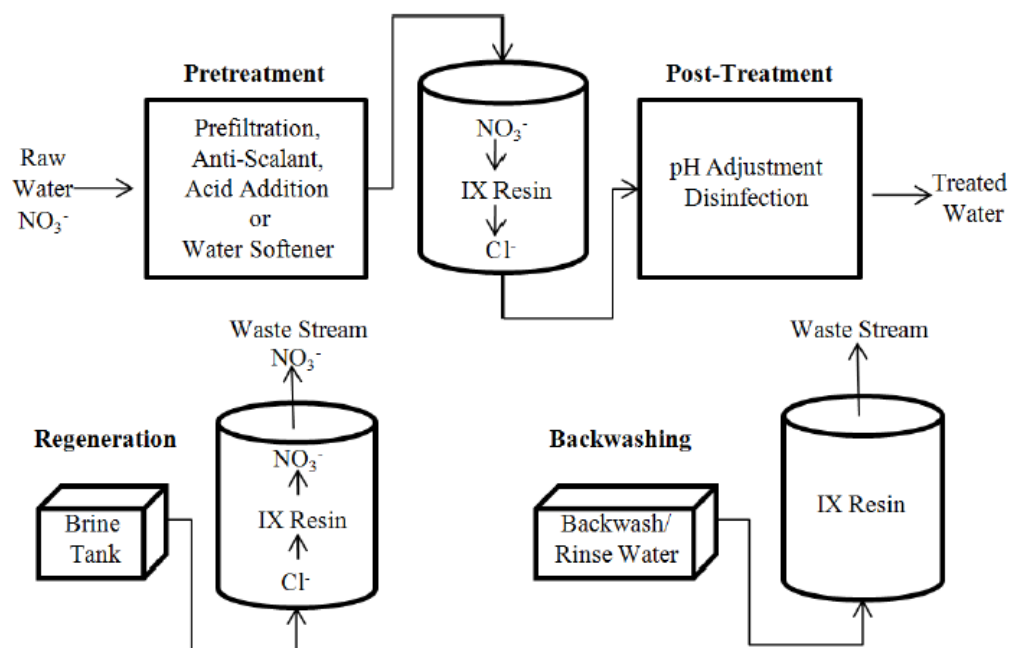
3.1 Iontová výměna

Iontová výměna je jedna z nejčastěji používaných metod pro odstraňování dusičnanů z vod. Podle [5] má tato metoda potenciál k tomu, aby díky ní byly odstraňovány i další znečišťující látky jako např. arsen, selen nebo chrom (v šestimocné formě).

Základem procesu iontové výměny jsou iontoměníče – ionexy. Jde o vysokomolekulární látky, které ve své struktuře obsahují disociovatelné funkční skupiny. Při disociaci těchto skupin jsou disociovány tzv. protionty, které mohou být nahrazeny ionty obsaženými ve vodě. [18, 19]

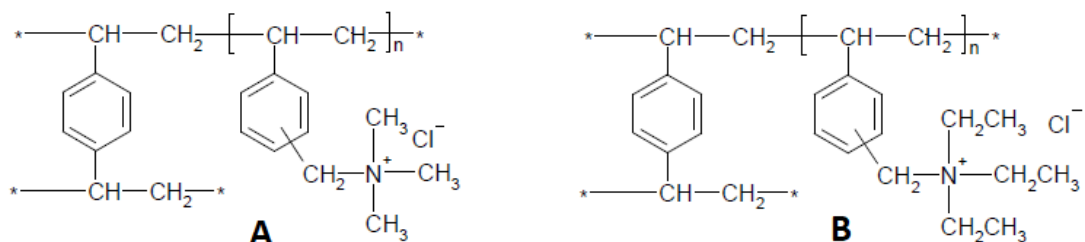
Ionexy dělíme na katexy a anexy. Při použití katexů jsou uvolněny kladně nabitě protionty, obvykle H^+ a Na^+ . U anexů jsou protionty nabitě záporně. Jsou to OH^- a Cl^- . [18,21]

Odstranění dusičnanů probíhá na silně bazickém anexu. Surová voda musí být předčištěna, aby došlo k odstranění nerozpustných a jiných látek, které by mohly znečistit membránu. Po předčištění je voda vedena k hlavnímu procesu čištění. Při kontaktu vody s membránou jsou chloridy z povrchu membrány nahrazovány dusičnany, čímž jsou odstraňovány z vody. Takto vyčištěná voda je poté dezinfikována. [20,21] Schéma procesu iontové výměny je zobrazen na Obrázku 2.



Obrázek 2: Schéma procesu iontové výměny [19]

Po vyčerpání anexu je nutná jeho regenerace. Ta se provádí roztokem s vysokým obsahem solí. Od používání iontové výměny k odstraňování dusičnanů z vod se v poslední době upouští, protože afinita membrán je $\text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{HCO}_3^-$. To má za následek, že sírany jsou z vody odstraňovány dříve než dusičnany, což způsobuje dřívější vyčerpání kapacity membrány. Aby byl tento velký nedostatek odstraněn, byly vynalezeny nové selektivní membrány, jejichž afinita je $\text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{HCO}_3^-$. [19,22] Rozdíly ve struktuře obou anexů ukazuje Obrázek 3.



Obrázek 3: A) Silně bazický anex B) anex selektivní na dusičnany [22]

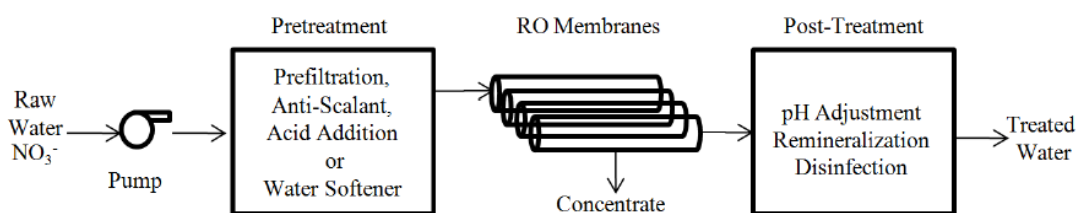
Iontovou výměnu lze využívat i při dalších procesech úpravy vod. Proces odstraňování dusičnanů je podobný procesům používaným k odstranění Ca^{2+} a Mg^{2+}

z vody. Kationty Ca^{2+} a Mg^{2+} nahrazuje na povrchu membrány kationt Na^+ . K tomuto procesu se ovšem využívají katexy. [18]

3.2 Reverzní osmóza

Tato metoda probíhá podobně jako fyzikální proces osmóza, který probíhá například v buňkách organismů. Jediný rozdíl je v tom, že voda při reverzní osmóze (RO) proudí opačným směrem. Reverzní osmózu lze použít při odstraňování více znečišťujících látek najednou. Jde např. o NO_3^- , As, Na^+ , Cl^- , F^- , a také o některé druhy pesticidů. [19,22]

Pomocí reverzní osmózy lze dělit nízkomolekulární látky z vodních roztoků. K realizaci tohoto procesu se používají membrány s vysokým hydrodynamickým odporem. Při reverzní osmóze je vnějším tlakem překonáván tlak osmotický [23,24]. Princip odstraňování dusičnanů pomocí procesu RO znázorňuje Obrázek 4.



Obrázek 4: Princip odstraňování dusičnanů pomocí reverzní osmózy [19]

Základem je polopropustná membrána, která odděluje dva prostory. V jednom je čisté rozpouštědlo (voda), ve druhém roztok nějaké nízkomolekulární látky. Jelikož má každá z látek jiný chemický potenciál, mají obě látky snahu se smísit. To ovšem není díky vlastnostem membrány možné. Přes membránu může pronikat pouze rozpouštědlo (voda). Díky tomuto je hladina v prostoru s roztokem nízkomolekulární látkou stále vyšší. Toto trvá do doby, než je nalezena rovnováha mezi osmotickým tlakem rozpouštědla a hydrostatickým tlakem roztoku. Přes membránu je tedy propouštěno pouze rozpouštědlo z roztoku, naopak nízkomolekulární látka je zadržována a přes membránu projít nemůže. [19,25] Princip reverzní osmózy je zobrazen na Obrázku 5.

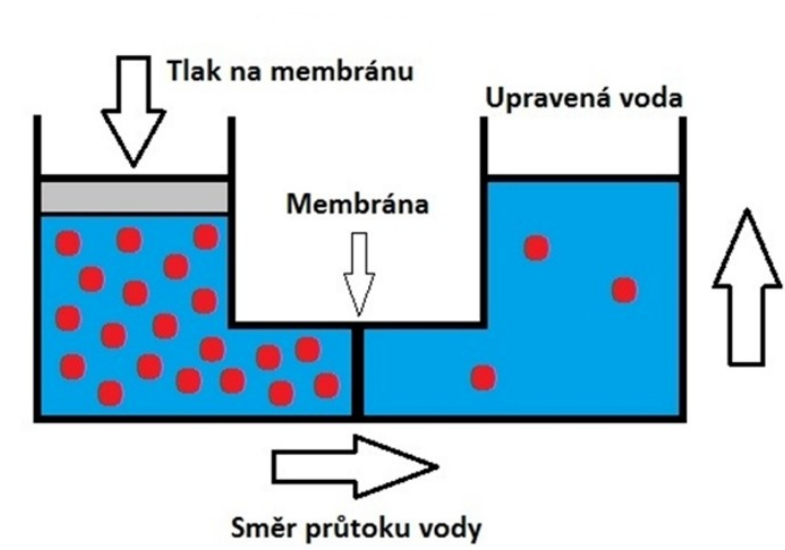
Velikost osmotického tlaku se vypočte podle vzorce:

$$\Pi = c \cdot R \cdot T$$

c....látková koncentrace

R....univerzální plynová konstanta (8,314 J/mol.K)

T....absolutní teplota



Obrázek 5: Princip procesu reverzní osmózy [26]

Životnost membrán pro reverzní osmózu závisí na četnosti používání a také kvalitě čištěné vody. Účinnost čištění snižují všechny látky, které zmenšují dostupnou plochu membrány. Přesáhne-li koncentrace solí bod nasycení povrchu membrány, látky se na membráně mohou začít srážet, a tím je omezen průchod vody membránou. Membrány mohou být zanášeny koloidními, biologickými i organickými látkami. Na životnost membrán mají negativní vliv zejména sraženiny oxidu křemičitého, vápníku, baria a stroncia. [19,25]

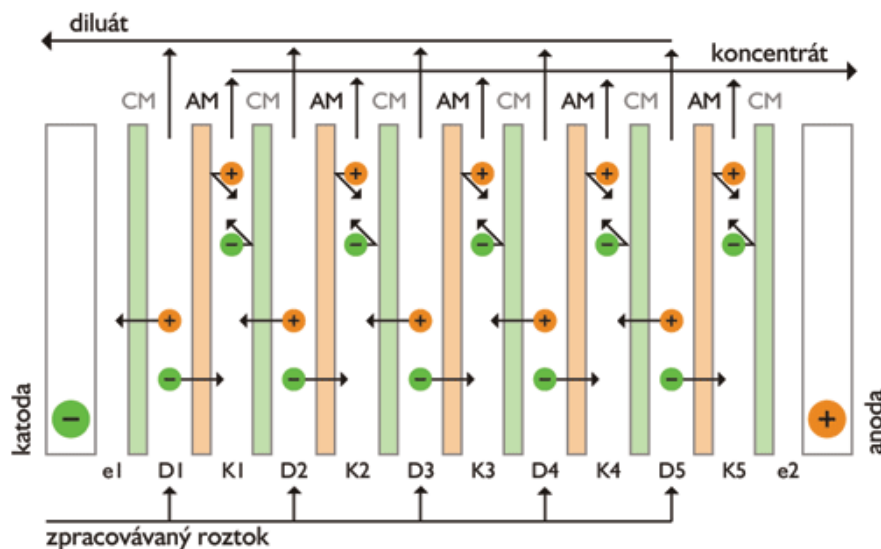
Při RO jsou důležité celkem 3 proudy vody, kterou upravujeme. Jedná se o *surovou vodu*, což je voda, kterou chceme pomocí RO upravovat. Dalším proudem je *permeát*. Jedná se o vyčištěnou vodu. Poslední je *koncentrát*, tedy voda, která obsahuje všechny látky zachycené membránou. [24,27]

Získaný koncentrát obsahuje velké množství odstraněných dusičnanů, které musí být také nějakým způsobem vyčištěny. Z tohoto důvodu je RO spojována s biologickou denitrifikací. Díky tomu jsou dusičnany z koncentráту redukovány na plynný dusík. [20,25]

Proces reverzní osmózy se využívá na výrobu pitné vody, a to při odsolování mořské vody. Dalším využitím je výroba velmi čisté vody pro elektrotechnický a farmaceutický průmysl, pro oplach chirurgických a laboratorních nástrojů před sterilizací. [17]

3.3 Elektrodialýza

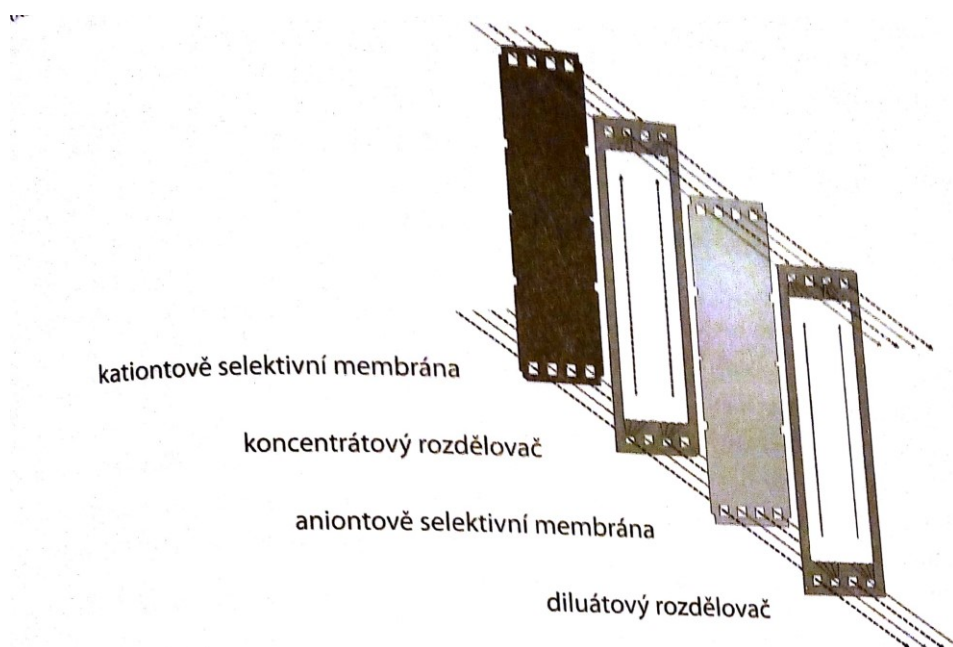
Elektrodialýza patří mezi separační elektromembránové procesy. Principem procesu je iontový průtok přes anion selektivní a kation selektivní membrány v konstantním elektrickém poli. Zařízení používané pro proces elektrodialýzy se nazývá elektrodialýzer. Jeho prostřednictvím může docházet ke koncentrování nebo demineralizaci roztoků. [16,19], Proces elektrodialýzy můžeme vidět na Obrázku 6.



Obrázek 6: Princip elektrodialýzy [29]

Hlavní, nejdůležitější částí elektrodialýzeru je membránový svazek. Ten je tvořen kationtově a aniontově selektivními membránami, které se pravidelně střídají. Mezi

jednotlivými membránami jsou tzv. rozdělovače. Vznikají diluátové a koncentrátové komory. Kapalinu protékající diluátovou komorou nazýváme diluát, kapalinu z koncentrátové komory pak koncentrát. [28,29] Složení membránového svazku je zobrazeno na Obrázku 7.



Obrázek 7: Membránový svazek [28]

Celý membránový svazek je „stahován“ stahovacími deskami, které mají na vnitřní straně elektrody. Hnací silou celého procesu je stejnosměrné napětí, které na elektrodách vyvolá stejnosměrný elektrický proud. Tímto proudem se z diluátu začnou odstraňovat elektrolyty a jsou přes membránu vedeny do koncentráту. [28,30]

Elektrodialýza může být provozována v potenciostatickém nebo galvanostatickém režimu. V prvně zmíněném procesu elektrodialýzy probíhá s konstantním napětím. V druhém případě se jedná o provoz s konstantním proudem. Z bezpečnostního hlediska je bezpečnější používání elektrodialýzy v režimu potenciostatickém. V režimu galvanostatickém může dojít k nekontrolovanému nárůstu napětí v elektrodializační jednotce, což může mít za následek přehřátí membránového svazku a tím jeho zničení [29,31].

Dalším dělením provozu elektrodialýzy je provoz přetržitý (vsádkový) a nepřetržitý (průtočný). Při vsádkovém provozu je roztok (diluát nebo koncentrát)

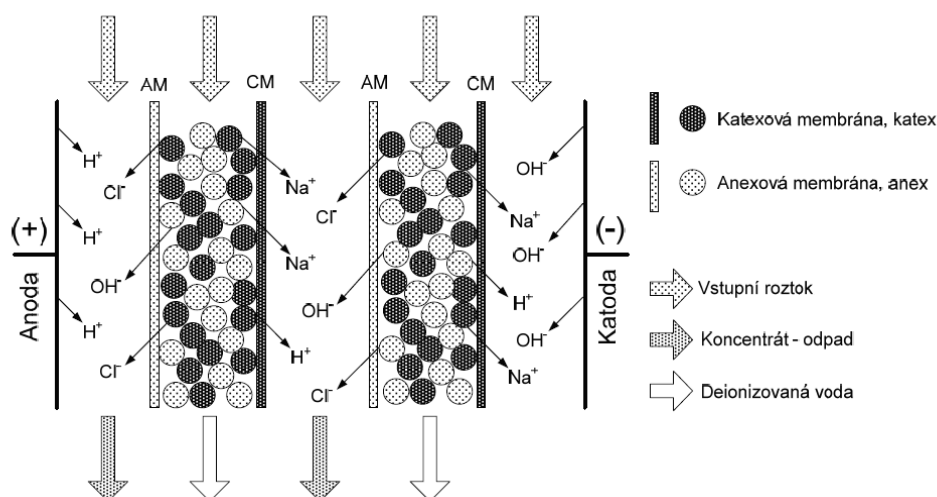
recirkulován tak dlouho, dokud nedojde k získání požadované hodnoty koncentrace solí. Roztoky koncentráту a diluátu mají vždy vlastní zásobní nádrž a okruh. Při nepřetržitém provozu tzv. průtočném, jsou roztoky diluátu a koncentráту dávkovány ze stejné nádrže a jejich produkty jsou také smíchávány. [21,29]

Ve srovnání s jinými metodami je elektrodialýza jednou z nejslibnějších metod, používaných k odstranění dusičnanů z vod. Mezi hlavní výhody procesu patří jeho snadná ovladatelnost, malá náročnost na množství použitých chemikálií, vysoký stupeň vyčištění vody a také (podle druhu použité membrány) velmi vysoká selektivita pro dusičnany. Denitrifikace vody elektrodialýzou je také ekonomicky velmi výhodná. Podle [19] jsou náklady při 85% vyčištění maximálně 0,1 \$ / m³.

Hlavním parametrem, který řídí průběh a náklady procesu elektrodialýzy, je proudová hustota - čím je větší, tím menší plocha povrchu membrány je potřebná. Doporučuje se však, aby proudová hustota nepřekročila mezní hodnotu (charakteristická pro danou koncentraci roztoku), neboť v průběhu procesu mohou nastat některé nežádoucí jevy (zvýšená energetická náročnost, změny pH atd.). [16,29]

Elektrodialýza má široké spektrum aplikací. Používá se k denitrifikaci vody pro pitné účely (Rakousko, Itálie, Nizozemsko, Francie, Švýcarsko), k výrobě stolní soli z mořské vody (zejména v Japonsku) nebo také k demineralizaci syrovátky. [16]

Negativem elektrodialýzy je vysoká vodivost získaného diluátu. Tento problém řeší proces **elektrodeionizace (EDI)**. Jde o kombinaci elektrodialýzy a iontové výměny. Hlavním rozdílem oproti elektrodialýze je vyplnění diluátových (někdy i koncentrátových) komor, směsným ionexovým ložem. [21,30] Schéma elektrodializace znázorňuje Obrázek 8.



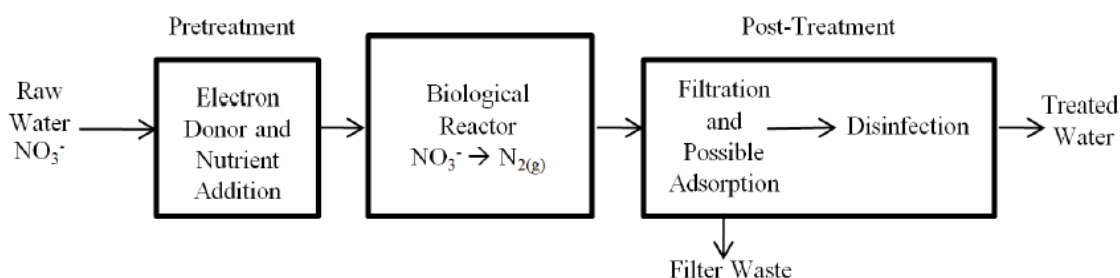
Obrázek 8: Schéma elektrodeionizace [21]

Úprava vody elektrodeionizací se používá pro výrobu superčisté vody. Ta má své využití ve farmaceutickém průmyslu nebo při výrobě elektroniky. Výhodou tohoto procesu je možnost kontinuálního procesu a žádné přídavné chemikálie. [21,31,32]

3.4 Biologická denitrifikace

Je procesem, který se často používá při čištění odpadních vod. Ovšem tuto metodu je možné použít také při úpravě pitné vody. Biologickou denitrifikací (BD) lze odstraňovat celou řadu znečišťujících látek, včetně dusičnanů, chromanů, chloristanu a stopových organických chemikálií. Biologická denitrifikace k úpravě pitné vody byla v Evropě zavedena již v roce 1804, v současné době se využívá v několika evropských zemích – ve Francii, Německu, Rakousku, Polsku, Itálii a Velké Británii. [8,17,20]

Denitrifikace je součástí koloběhu dusíku. Při aplikaci biologické denitrifikace na úpravu pitné vody se k přeměně dusičnanů na neškodný dusík využívají denitrifikační bakterie. Celý proces probíhá v nepřítomnosti kyslíku, to znamená v anoxických podmínkách [3,15]. Proces je vyobrazen na Obrázku 9. V přítomnosti kyslíku by bakterie přednostně redukovaly kyslík před dusičnany, což snižuje účinnost procesu.



Obrázek 9: Proces biologické denitrifikace [19]

Pro efektivní fungování biologického denitrifikačního systému je nezbytné udržovat optimální podmínky pro bakterie. Jedná se především o vhodný substrát a dostatek živin. Důležité je také dodržování postupů předčištění a následného čištění tak, aby upravená voda splňovala podmínky pro pitnou vodu. Dalšími faktory ovlivňující náklady na systém jsou velikost zařízení (průtok), kvalita surové vody, faktory prostředí (teplota a pH) a v neposlední řadě také cílová koncentraci dusičnanů. [17,33]

3.5 Elektrokoagulace

Elektrokoagulace (EC) je proces destabilizace suspendovaných, emulgovaných nebo rozpuštěných kontaminantů ve vodě v přítomnosti elektrického proudu. V nejjednodušší formě je elektrokoagulační reaktor tvořen elektrolytickým článkem s jednou anodou a jednou katodou. Obě elektrody mohou být ze stejných nebo různých materiálů. Jednu z elektrod, anodu, nazýváme obětovaná. Ta je většinou z železa nebo hliníku [34]. Když systémem projde elektrický proud, anoda se rozpustí, což vede k vytvoření kovových kationtů. Tyto kationty spontánně vytvářejí v roztoku sraženiny polymerních kovových hydroxidů a mohou způsobit neutralizaci negativně nabitých částic. Jakmile jsou částice neutralizovány, mohou se navzájem spojit a vytvářet agregáty nebo vločky, čímž jsou znečišťující látky odstraněny. Typ a množství vzniklých sraženin závisí na pH a koncentraci kovů ve vodě. [35,36]

Pro proces EC je charakteristická nízká produkce kalu, malá náročnost ohledně použitých chemikálií a snadná obsluha. V posledních letech přitahuje elektrokoagulace velkou pozornost jako ekologický, efektivní a ekonomicky výhodný proces. Byly zaznamenány případy, kdy bylo odstraněno až 99 % nečistot. [35,37]

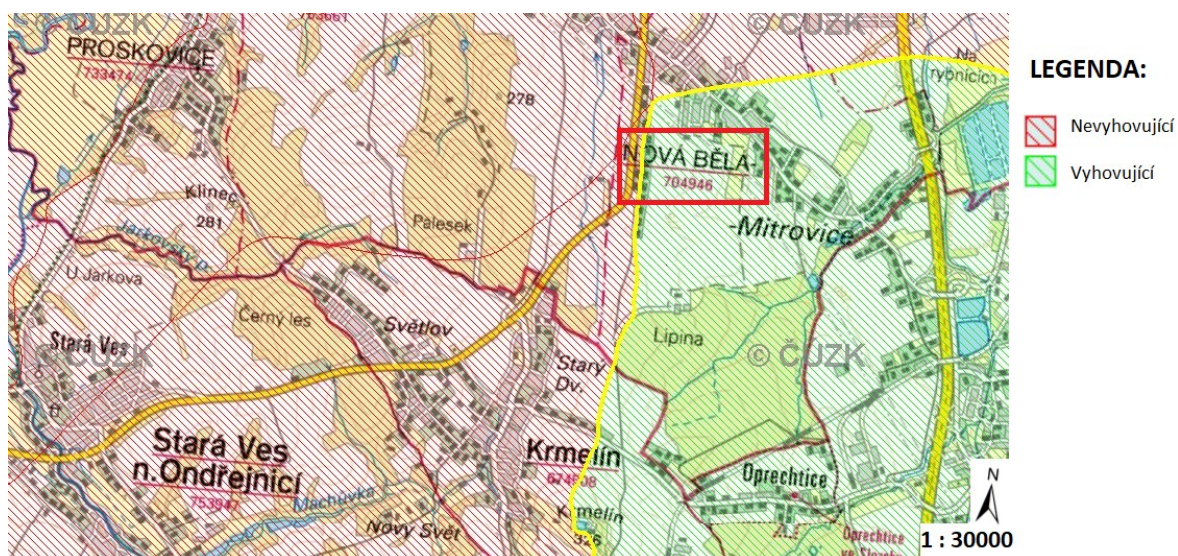
4 CHARAKTERISTIKA STUDOVANÝCH LOKALIT A TESTOVANÝCH METOD

4.1 Vybrané lokality

Testované vzorky byly odebrány z lokalit **Nová Bělá** a **Krásné Pole**. Z Nové Bělé pochází jeden vzorek, z Krásného Pole zbylé dva. Vzorky z druhé zmíněné lokality byly konkrétně odebrány z ulic Předvrší a Branecká. Ve všech případech se jedná o vody odebrané z domovních studní.

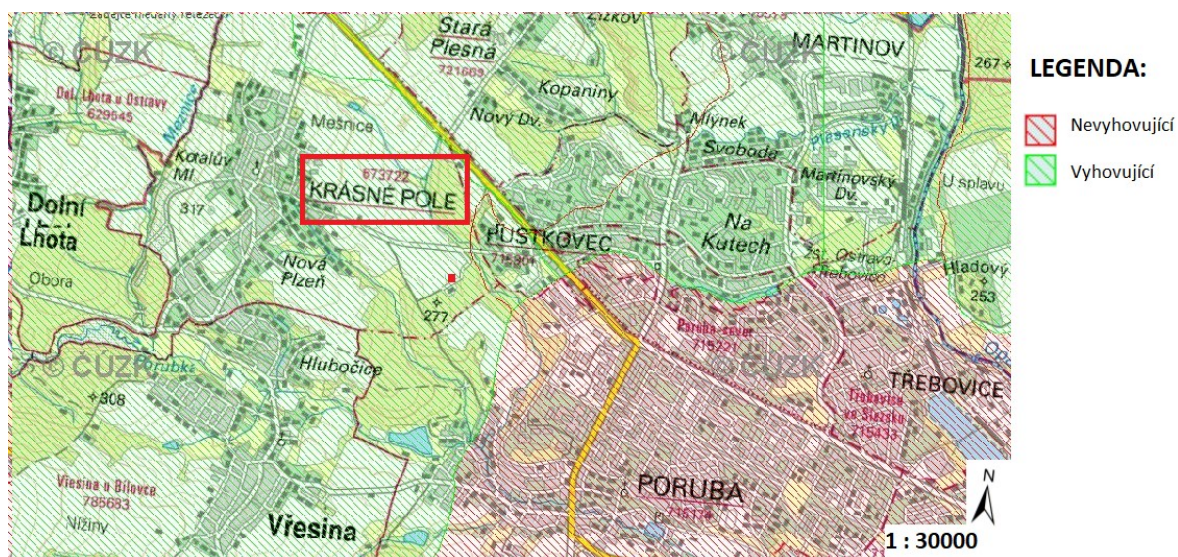
Obě lokality jsou obvody Statutárního města Ostrava. Novou Bělou můžeme označit za nejjižnější ostravský obvod, Krásné Pole je zase ten nejzápadnější. U obou obcí se jedná o částečně zastavěné území, vyskytují se zde také pole a louky. Lze tedy předpokládat, že se zde často vyskytuje zemědělská činnost.

Útvar podzemních vod, který odpovídá lokalitě Nová Bělá je Flyš v povodí Ostravice. Celková plocha tohoto útvaru je 676,753 km². Podle portálu HEIS, je chemický stav útvarů podzemních vod v této oblasti vyhovující. Podle podrobné analýzy vyhovuje voda z této oblasti požadavkům na podzemní vodu ve všech parametrech kromě dusičnanů a amonných iontů. [38] Chemický stav podzemních vod v této oblasti zobrazuje Obrázek 10.



Obrázek 10: Chemický stav podzemních vod v lokalitě Nová Bělá [39]

Obci Krásné Pole odpovídá útvar podzemních vod Kulm Nízkého Jeseníku v povodí Odry. Celková plocha útvaru činí 2 776,21 km². Podle chemické analýzy podzemní vody v této oblasti, jejichž výsledky uvádí portál HEIS, je kvalita podzemních vod v této oblasti vyhovující. Požadavky na podzemní vody nejsou splněny pouze v jednom parametru, kterým jsou dusičnany. [38] Stav podzemních vod v této oblasti je znázorněn na Obrázku 11.



Obrázek 11: Chemický stav podzemních vod v lokalitě Krásné Pole [39]

4.2 Vstupní analýza

Vstupní analýzy všech vzorků proběhly v laboratořích vody VŠB-TUO. Všechny testy probíhaly podle laboratorních návodů institutu environmentálního inženýrství [40].

Atomovou absorpční spektrofotometrií (AAS) byly stanoveny NO_2^- , s použitím N-/1-naftyl/-ethylendiaminhydrochloridu, NO_3^- , s použitím kyseliny salicylové, NH_4^+ pomocí Nesslerova činidla, Fe s použitím thiokyanatanu, Al pomocí Eriochromcyaninu R. Dále byly pomocí AAS stanoveny SO_4^{2-} , Mn, P_{celkový} a zákal.

Chelatometrickým stanovením byly zjištěny hodnoty koncentrace Ca a Mg. Použitím odměrného argentometrického stanovení byla zjištěna koncentraci chloridů Cl^- . Hodnoty pH byly změřeny pH metrem, konduktivita vodivostní sondou. Ke zjištění celkového CHSK byla vybrána metoda podle Kubela.

4.3 Elektrodialyzační jednotka

Všechny testy byly provedeny pomocí elektrodialyzační jednotky ED(R)-Z/10-1.0 typu P od firmy MEGA a.s. (obrázek 12). Součástí odsolovací jednotky byl elektrodialyzační modul ED(R)-Z/10-1.0, taktéž od firmy MEGA a.s. [28] (Obrázek 13).



Obrázek 12: Elektrodialyzační jednotka ED(R)-Z/10-1.0 [Bc. Kotalová, 2018]

Elektrodialyzační jednotka je složena z těchto základních částí. Jedná se o:

- Zásobníky diluátu, koncentrátu s elektrodového roztoku,
- bezucpávková, odstředivá čerpadla,
- rotametry,
- cely pro pH a vodivostní sondy,
- zdroj stejnosměrného napětí (2 A, 28 V),
- hadičky

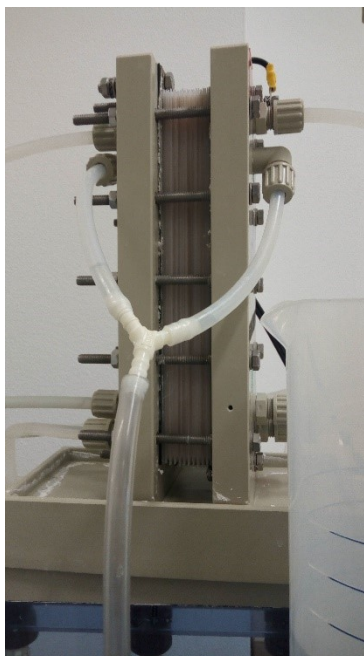
Provozní limity jednotky, které uvádí výrobce jsou v Tabulce 1.

Tabulka 1: Provozní limity elektrodialyzační jednotky ED(R)-Z/10-1.0 [28]

Veličina		Parametr
Elektro U/I		max. 24 V/ 2 A
Provozní průtoky	D, K	60 - 80 l/h
	E	50 - 60 l/h
Minimální průtoky	D, K	30 l/h
	E	20 l/h
Teplota	provozní	20-30 °C
	minimální	10 °C
	maximální	35 °C

Nejdůležitějším prvkem je elektrodialyzační modul (Obrázek 13). Ten se skládá z:

- stahovacích desek se zabudovanými elektrodami,
- ionexové heterogenní membrány RALEX,
- PE rozdělovače,
- svorníky,
- rovnací kolíky



Obrázek 13: Elektrodialyzační modul ED(R)-Z/10-1.0 [Bc. Kotalová,2018]

Ionexové membrány (anexové a katexové) se pravidelně střídají. Mezi nimi jsou umístěny rozdělovače. Takto vzniklý membránový svazek je stahován stahovacími deskami s elektrodami. Vznikají diluátové a koncentrátové komory, kterými proudí odsolené a zakonzentrované roztoky. Elektrodializační modul je zobrazen na obrázku 13. Základní charakteristické hodnoty elektrodialyzačního modulu uvádí Tabulka 2.

Tabulka 2: Charakteristické hodnoty elektrodialyzačního modulu ED(R)-Z/10-1.0 [28]

Veličina	Parametr
Celkový počet membránových párů	10 párů
Počet diluátových komor D	10
Počet koncentrátových komor K	10
Počet elektrodových komor E	2
Celková instalovaná plocha membrán	2646 cm ²
Celková efektivní plocha membrán	1344 cm ²
Celkové rozměry ED modulu	120x250x90 mm

5 METODIKA TESTŮ A ANALÝZ

V následující kapitole budou shrnuty metodiky provedených testů a analýz. Hodnoty získávané během testů jsou srovnávány s limitními hodnotami z vyhlášky 252/2004 Sb., která stanovuje hygienické požadavky na pitnou a teplou vodu a četnost a rozsah kontroly vody pitné. Ve vyhlášce se objevují tři druhy limitů.

Mezní hodnota (MH) – horní hranice příslušné hodnoty, jejímž překročením ztrácí voda vyhovující jakost v daném ukazateli.

Nejvyšší mezní hodnota (NMH) – hodnota ukazatele, jejímž překročením je vyloučeno použití vody jako pitné.

Doporučená hodnota (DH) – hodnota ukazatele, která odpovídá optimální koncentraci dané látky z hlediska pitné vody. [4]

5.1 Vstupní analýza

Vzorek Nová Bělá byl odebrán 4. 9. 2017. Vstupní rozbor byl proveden 6. 9. 2017. Získané hodnoty vstupního rozboru jsou uvedeny v Tabulce 3.

Tabulka 3: Hodnoty vstupního rozboru vzorku Nová Bělá

Ukazatele	Symbol	Jednotka	Vstup	Limit	Typ limitu
amonné ionty	NH_4^+	mg/l	0,16	0,5	MH
celkový fosfor	P	mg/l	0,05	-	
dusičnany	NO_3^-	mg/l	58,80	50	NMH
dusitany	NO_2	mg/l	0,00	0,5	NMH
draslík	K	mg/l	5,74	-	
hliník	Al	mg/l	0,00	0,2	MH
hořčík	Mg	mg/l	10,20	10	MH
chem.spotřeba kyslíku Mn	CHSK Mn	mg/l	0,07	10	MH
chloridy	Cl^-	mg/l	44,14	100	MH
konduktivita	K	mS/m	61,10	125	MH
mangan	Mn	mg/l	<0,020	0,05	MH
pH		pH	5,94	6,5 - 9,5	MH
sírany	SO_4^{2-}	mg/l	72,00	250	MH
sodík	Na	mg/l	29,40	200	MH
vápník	Ca	mg/l	60,40	40 – 80	DH
vápník + hořčík	Ca + Mg	mmol/l	-	2 - 3,5	DH
zákal		ZF	0,00	5	MH
železo	Fe	mg/l	0,05	0,2	MH
teplota	T	°C	19,60	8 – 12	DH

Vzorek Krásné Pole Předvrší byl odebrán 3. 9. 2017. Vstupní rozbor byl proveden 6. 9. 2017. Získané hodnoty vstupního rozboru jsou uvedeny v Tabulce 4.

Tabulka 4: Vstupní analýza vzorku Krásné Pole Předvrší

Ukazatele	Symbol	Jednotka	Vstup	Limit	Typ limitu
amonné ionty	NH_4^+	mg/l	0,25	0,5	MH
celkový fosfor	P	mg/l	0,23	-	
dusičnany	NO_3^-	mg/l	77,60	50	NMH
dusitany	NO_2	mg/l	0,03	0,5	NMH
draslík	K	mg/l	6,94	-	
hliník	Al	mg/l	0,00	0,2	MH
hořčík	Mg	mg/l	10,00	10	MH
chem.spotřeba kyslíku Mn	CHSK Mn	mg/l	3,03	10	MH
chloridy	Cl^-	mg/l	33,68	100	MH
konduktivita	K	mS/m	67,70	125	MH
mangan	Mn	mg/l	<0,020	0,05	MH
pH		pH	7,45	6,5 - 9,5	MH
sírany	SO_4^{2-}	mg/l	69,00	250	MH
sodík	Na	mg/l	39,30	200	MH
vápník	Ca	mg/l	57,80	40 – 80	DH
vápník + hořčík	Ca + Mg	mmol/l	-	2 - 3,5	DH
zákal		ZF	1,35	5	MH
železo	Fe	mg/l	0,13	0,2	MH
teplota	T	°C	22,10	8 – 12	DH

Vzorek Krásné Pole Braněcká byl odebrán 3. 9. 2017. Dne 6. 9. 2017 proběhla vstupní analýza vzorku. Hodnoty, které byly vstupní analýzou získány jsou zapsány v Tabulce 5.

Tabulka 5: Vstupní analýza vzorku Krásné Pole Braněcká

Ukazatele	Symbol	Jednotka	Vstup	Limit	Typ limitu
amonné ionty	NH_4^+	mg/l	0,13	0,5	MH
celkový fosfor	P	mg/l	0,30	-	
dusičnany	NO_3^-	mg/l	82,40	50	NMH
dusitany	NO_2^-	mg/l	0,00	0,5	NMH
draslík	K	mg/l	6,25	-	
hliník	Al	mg/l	0,00	0,2	MH
hořčík	Mg	mg/l	9,18	10	MH
chem.spotřeba kyslíku Mn	CHSK Mn	mg/l	0,76	10	MH
chloridy	Cl^-	mg/l	24,99	100	MH
konduktivita	K	mS/m	55,30	125	MH
mangan	Mn	mg/l	<0,020	0,05	MH
pH		pH	6,70	6,5 - 9,5	MH
sířany	SO_4^{2-}	mg/l	66,00	250	MH
sodík	Na	mg/l	31,20	200	MH
vápník	Ca	mg/l	46,20	40 – 80	DH
vápník + hořčík	Ca + Mg	mmol/l	-	2 - 3,5	DH
zákal		ZF	0,08	5	MH
železo	Fe	mg/l	0,04	0,2	MH
teplota	T	°C	22,30	8 – 12	DH

Z výsledků vstupních analýz vzorků (tabulky 3, 4, 5) vyplývá, že u všech vzorků byl překročen limit pro obsah dusičnanů v pitné vodě. U vzorku pocházející z Nové Bělé je navíc překročen ještě limit pro obsah hořčíku. Mezní hodnota pro tento ukazatel je stanovena na 10 mg/l, podle vstupní analýzy je koncentrace hořčíku v prvním vzorku 10,2 mg/l. U všech vzorků je zvýšena teplota. To mohlo být způsobeno teplotou prostředí, ve kterém se analýzy vzorků uskutečnily.

5.2 ED testy

Před každým ED testem musel být proveden tzv. solný test. Ten probíhal, tak, že byl připraven roztok Na_2SO_4 o koncentraci 2 mol/l, který byl následně odsolen. Výsledky solného testu slouží k tomu, aby byla ověřena správnost funkce celého přístroje.

Po úspěšném solném testu mohlo být přistoupeno k samotnému odsolování vybraných vzorků. U každého vzorku byly provedeny celkem 4 testy. Test s 2 l diluátu a 2 l koncentrátu byl u každého vzorku opakován 3x. Poté následoval ještě jeden test s použitím 7,5 l diluátu a 0,5 l koncentrátu. U všech testů, bez ohledu na použité objemy diluátu a koncentrátu, bylo použito 250 ml elektrodového roztoku.

Všechny testy probíhaly v tzv. potenciostatickém režimu, tedy za použití konstantního napětí na svazku – 14 V. O všech testech taky můžeme říct, že probíhaly v přetržitém (vsádkovém) režimu.

Během testů bylo sledováno několik parametrů, které byly zaznamenávány v pravidelných pětiminutových intervalech. Jednalo se o celkové napětí U, proud A, hodnoty pH diluátu a koncentrátu, hodnoty konduktivity diluátu a koncentrátu. Důležitá byla také teplota.

5.2.1 Nová Bělá

U vzorku byly provedeny celkem tři testy ve vsádkovém režimu. Všechny testy proběhly 7. 9. 2017. Po dobu všech testů bylo napětí na svazku konstantní 14 V. Testy probíhaly s použitím 2 l diluátu a 2 l koncentrátu. V Tabulkách 6, 7, 8, 9 jsou uvedeny základní informace ke všem testům provedených u tohoto vzorku. Získané výsledky jsou zpracovány v grafech na Obrázcích 14, 15, 16.

Tabulka 6: Základní informace pro testy vzorku Nová Bělá V(D) = 2 l, V(K) = 2 l

N [párů]	10
U svazek [V]	14
Roztok D	Vzorek Nová Bělá
Roztok K	Vzorek Nová Bělá
Roztok E	Na ₂ SO ₄
Režim D	BATCH
Režim K	BATCH
Režim E	BATCH

Tabulka 7: Základní hodnoty pro 1. test vzorku Nová Bělá V(D) = 2 l, V(K) = 2 l

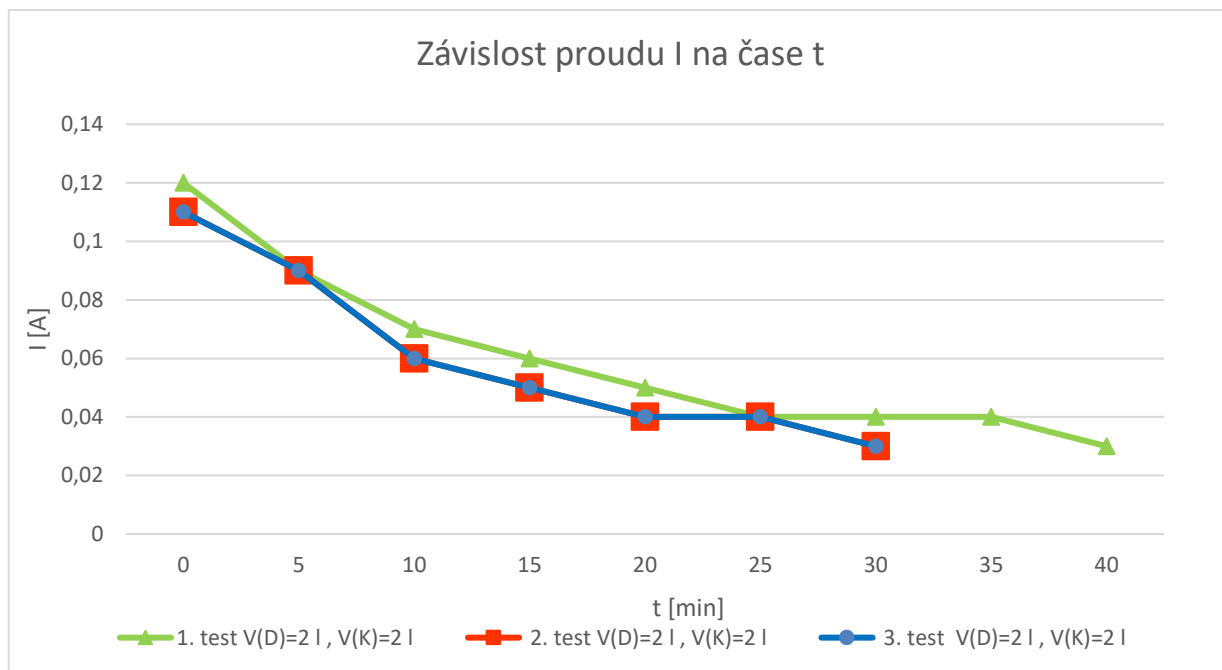
	D	K	E
\tilde{V} [l/h]	47	38	60
\tilde{V} [l/h] konec	47	40	60
κ_0 [mS/cm]	0,610	0,610	
κ_{konec} [mS/cm]	0,121	1,479	
V ₀ [l]	2	2	0,25
V _{konec} [l]	2	1,95	

Tabulka 8: Základní hodnoty pro 2. test vzorku Nová Bělá V(D) = 2 l, V(K) = 2 l

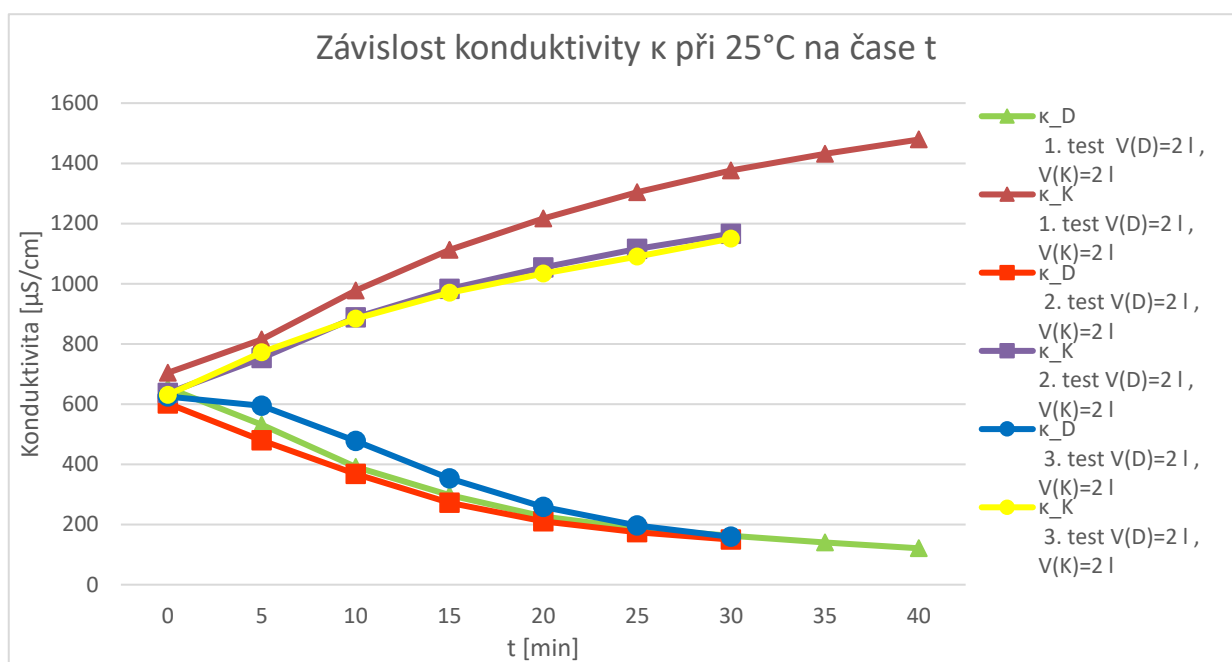
	D	K	E
\tilde{V} [l/h]	35	40	60
\tilde{V} [l/h] konec	38	40	63
κ_0 [mS/cm]	0,610	0,610	
κ_{konec} [mS/cm]	0,150	1,166	
V ₀ [l]	2	2	0,25
V _{konec} [l]	2,05	1,925	

Tabulka 9: Základní hodnoty pro 3. test vzorku Nová Bělá V(D) = 2 l, V(K) = 2 l

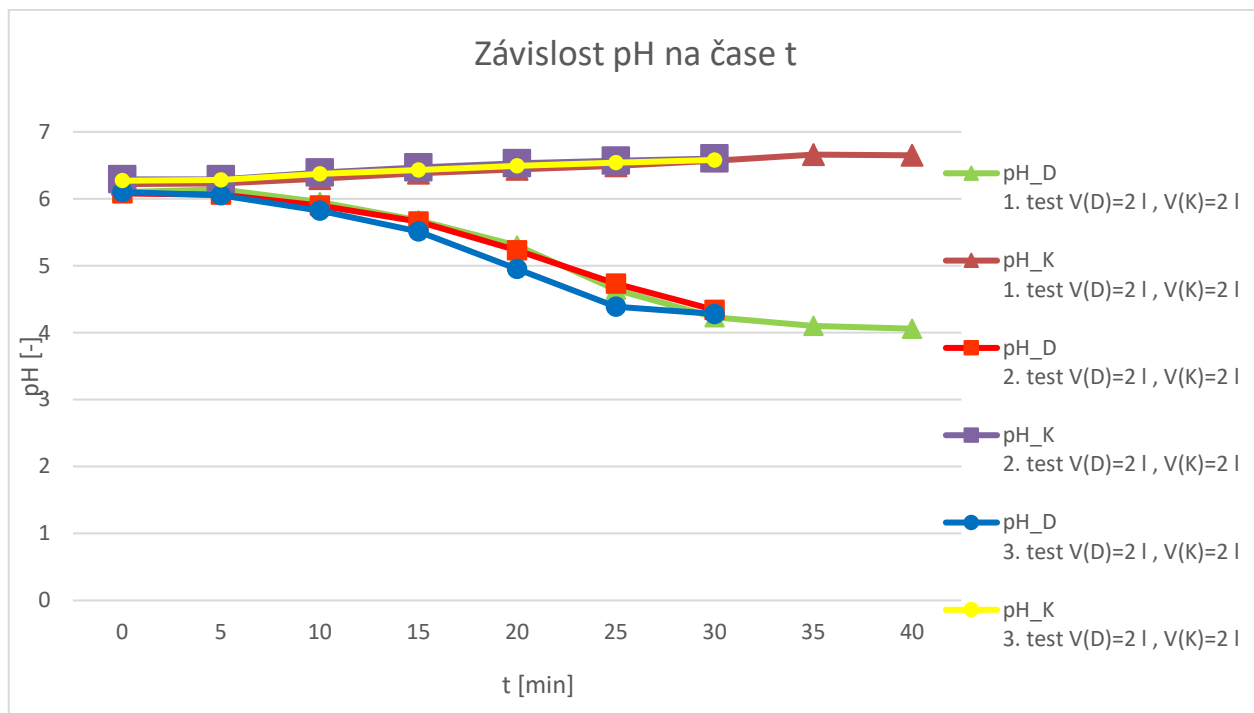
	D	K	E
\tilde{V} [l/h]	40	40	60
\tilde{V} [l/h] konec	40	40	62
κ_0 [mS/cm]	0,610	0,610	
κ_{konec} [mS/cm]	0,159	1,150	
V ₀ [l]	2	2	0,25
V _{konec} [l]	2,025	1,95	



Obrázek 14: Graf změny proudu v čase u vzorku Nová Bělá (testy $V(D) = 2\text{ l}$, $V(K) = 2\text{ l}$)



Obrázek 15: Graf změny konduktivity diluátu κ_D a koncentráty κ_K při 25°C v čase u vzorku Nová Bělá (testy $V(D) = 2\text{ l}$, $V(K) = 2\text{ l}$)



Obrázek 16: Graf změny pH diluátu a koncentráту v čase u vzorku Nová Bělá (testy V(D) = 2 l, V(K) = 2 l)

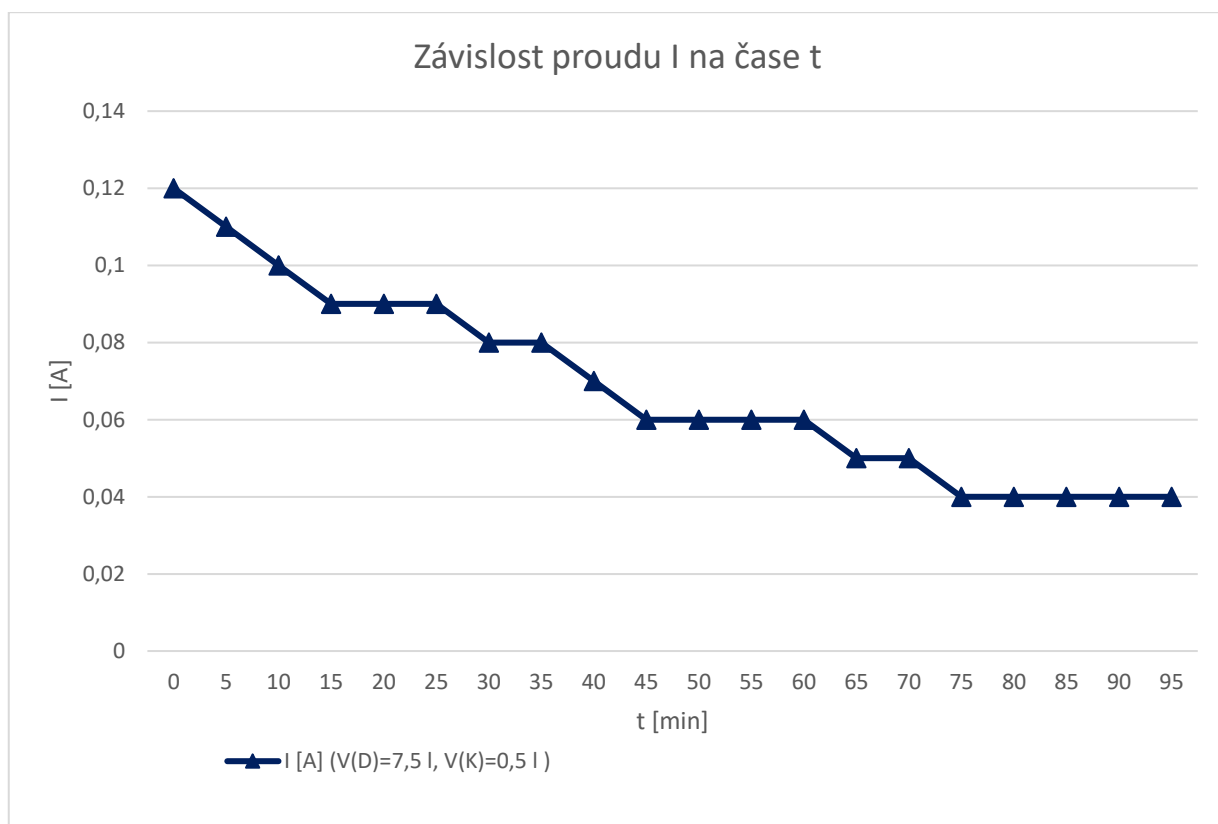
Dále byl proveden test odsolení s pomocným peristaltickým čerpadlem. Test byl proveden 11. 9. 2017. Také u tohoto testu byla hodnota napětí na svazku konstantní a to 14 V. Test probíhal za použití 7,5 l diluátu a 0,5 l koncentrátu. Základní informace o tomto testu uvádí Tabulky 10, 11. Výsledky jsou zpracovány do grafů na Obrázcích 17,18.

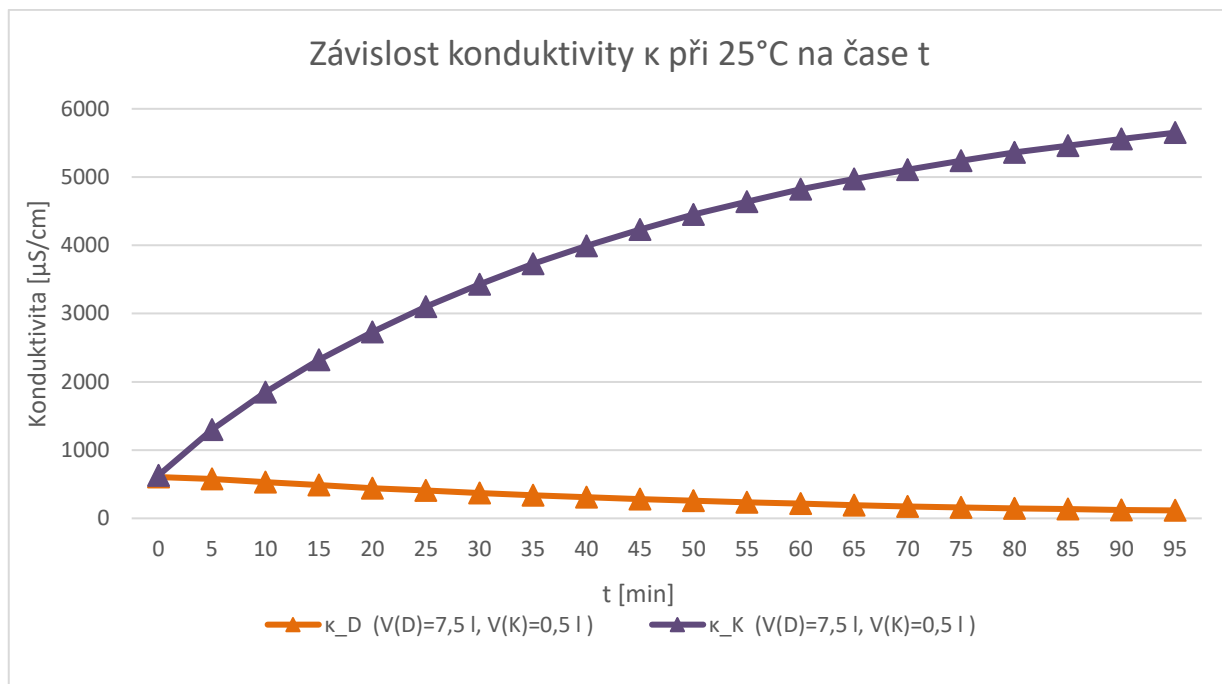
Tabulka 10: Základní informace pro test vzorku Nová Bělá (V(D) = 7,5 l, V(K) = 0,5 l)

N [párů]	10
U svazek [V]	14
Roztok D	Vzorek Nová Bělá
Roztok K	Vzorek Nová Bělá
Roztok E	Na ₂ SO ₄
Režim D	BATCH
Režim K	BATCH
Režim E	BATCH

Tabulka 11: Základní hodnoty pro test vzorku Nová Bělá ($V(D) = 7,5 \text{ l}$, $V(K) = 0,5 \text{ l}$)

	D	K	E
$\tilde{V} \text{ [l/h]}$	54	49	65
$\tilde{V} \text{ [l/h] konec}$	55	45	65
$\kappa_0 \text{ [mS/cm]}$	0,610	0,610	
$\kappa_{\text{konec}} \text{ [mS/cm]}$	0,117	5,650	
$V_0 \text{ [l]}$	7,64	0,5	0,25
$V_{\text{konec}} \text{ [l]}$	7,63	0,51	

Obrázek 17: Graf změny proudu v čase pro test vzorku Nová Bělá ($V(D) = 7,5 \text{ l}$, $V(K) = 0,5 \text{ l}$)



Obrázek 18: Graf změny konduktivity diluátu κ_D a koncentrátu κ_K při 25 °C v čase u vzorku Nová Bělá (testy $V(D) = 7,5 \text{ l}$, $V(K) = 0,5 \text{ l}$)

5.2.2 Krásné Pole – Předvrší

Dne 7. 9. 2017 byly provedeny celkem tři testy ve vsádkovém režimu. Všechny testy probíhaly za konstantního napětí na svazku 14 V. K testu byly použity 2 l diluátu a 2 l koncentrátu. V Tabulkách 12, 13, 14, 15 jsou uvedeny základní informace ke všem provedeným testům. Získané výsledky jsou zpracovány v grafech na Obrázcích 19, 20.

Tabulka 12: Základní informace pro testy vzorku Krásné Pole Předvrší $V(D) = 2 \text{ l}$, $V(K) = 2 \text{ l}$

N [párů]	10
U svazek [V]	14
Roztok D	Vzorek Krásné Pole Předvrší
Roztok K	Vzorek Krásné Pole Předvrší
Roztok E	Na_2SO_4
Režim D	BATCH
Režim K	BATCH
Režim E	BATCH

Tabulka 13: Základní hodnoty pro 1. test vzorku Krásné Pole Předvrší V(D) = 2 l, V(K) = 2 l

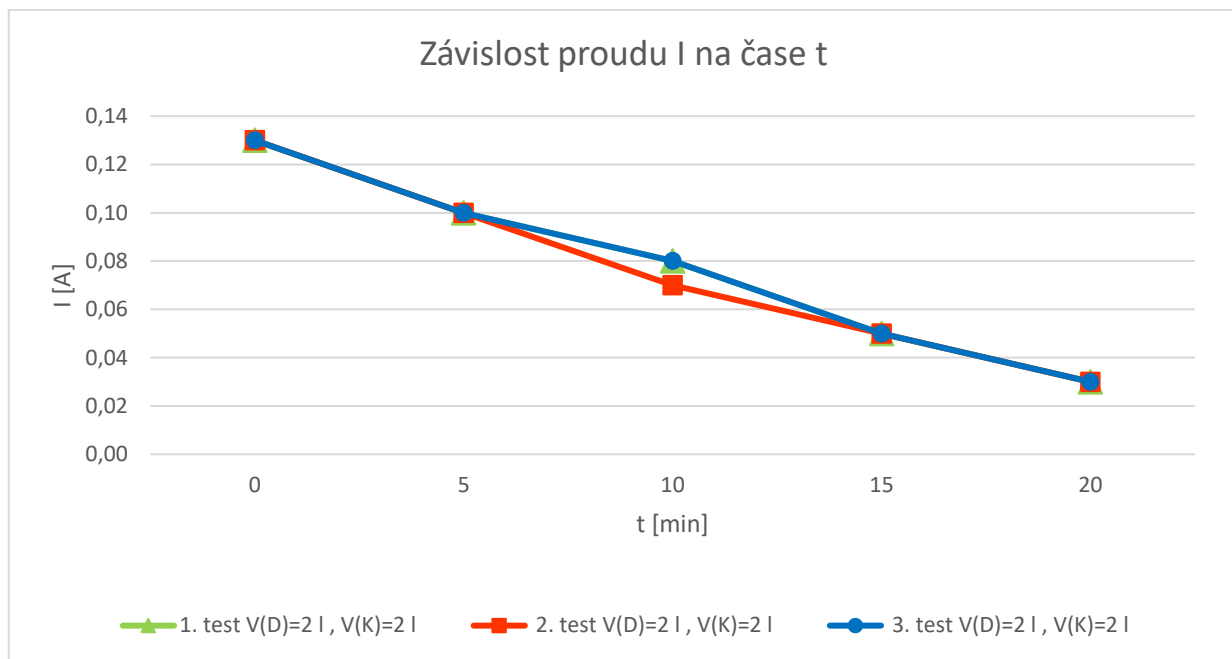
	D	K	E
\tilde{V} [l/h]	54	45	65
\tilde{V} [l/h] konec	55	47	65
κ_0 [mS/cm]	0,677	0,677	
κ_{konec} [mS/cm]	0,172	1,134	
V ₀ [l]	2	2	0,25
V _{konec} [l]	2	1,95	

Tabulka 14: Základní hodnoty pro 2. test vzorku Krásné Pole Předvrší V(D) = 2 l, V(K) = 2 l

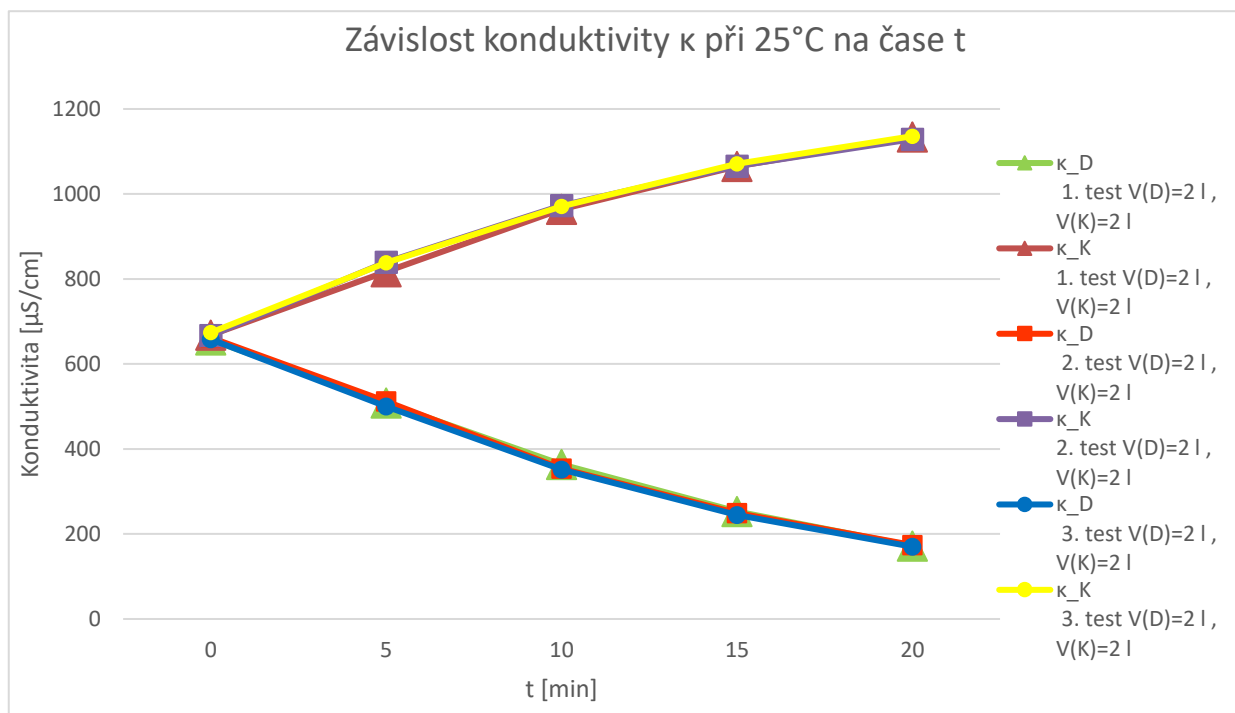
	D	K	E
\tilde{V} [l/h]	60	45	65
\tilde{V} [l/h] konec	54	45	65
κ_0 [mS/cm]	0,677	0,677	
κ_{konec} [mS/cm]	0,174	1,129	
V ₀ [l]	2	2	0,25
V _{konec} [l]	2	2,02	

Tabulka 15: Základní hodnoty pro 3. test vzorku Krásné Pole Předvrší V(D) = 2 l, V(K) = 2 l

	D	K	E
\tilde{V} [l/h]	54	45	65
\tilde{V} [l/h] konec	55	45	65
κ_0 [mS/cm]	0,677	0,677	
κ_{konec} [mS/cm]	0,170	1,136	
V ₀ [l]	2	2	0,25
V _{konec} [l]	2	2,01	



Obrázek 19: Graf změny proudu na čase u vzorku Krásné Pole Předvrší (testy $V(D) = 2\text{ l}$, $V(K) = 2\text{ l}$)



Obrázek 20: Graf změny konduktivity diluátu a koncentráту při 25°C v čase u vzorku Krásné Pole Předvrší (testy $V(D) = 2\text{ l}$, $V(K) = 2\text{ l}$)

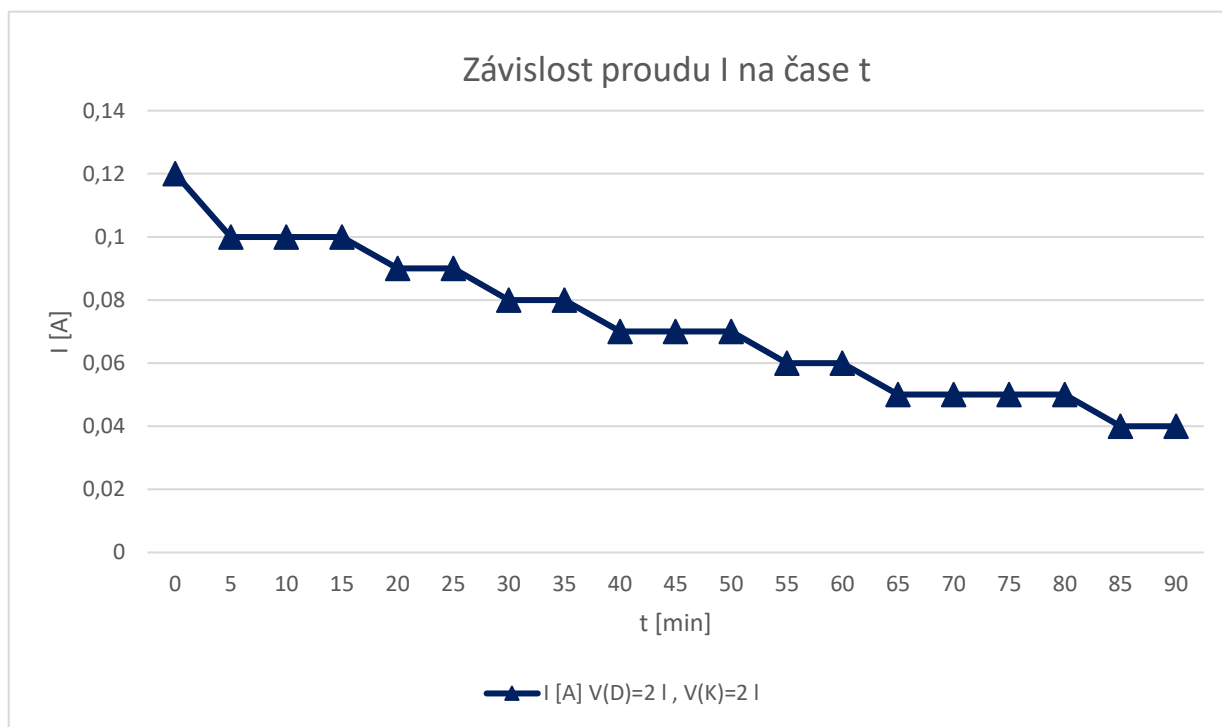
Také byl proveden test s použitím 7,5 l diluátu a 0,5 l koncentráту. Test proběhl 11. 9. 2017. K tomuto měření muselo být použito externí čerpadlo. Informace o testu uvádí Tabulky 16, 17. Získané hodnoty jsou zobrazeny graficky na Obrázcích 21, 22.

Tabulka 16: Základní informace pro test vzorku Krásné Pole Předvrší V(D) = 7,5 l, V(K) = 0,5 l

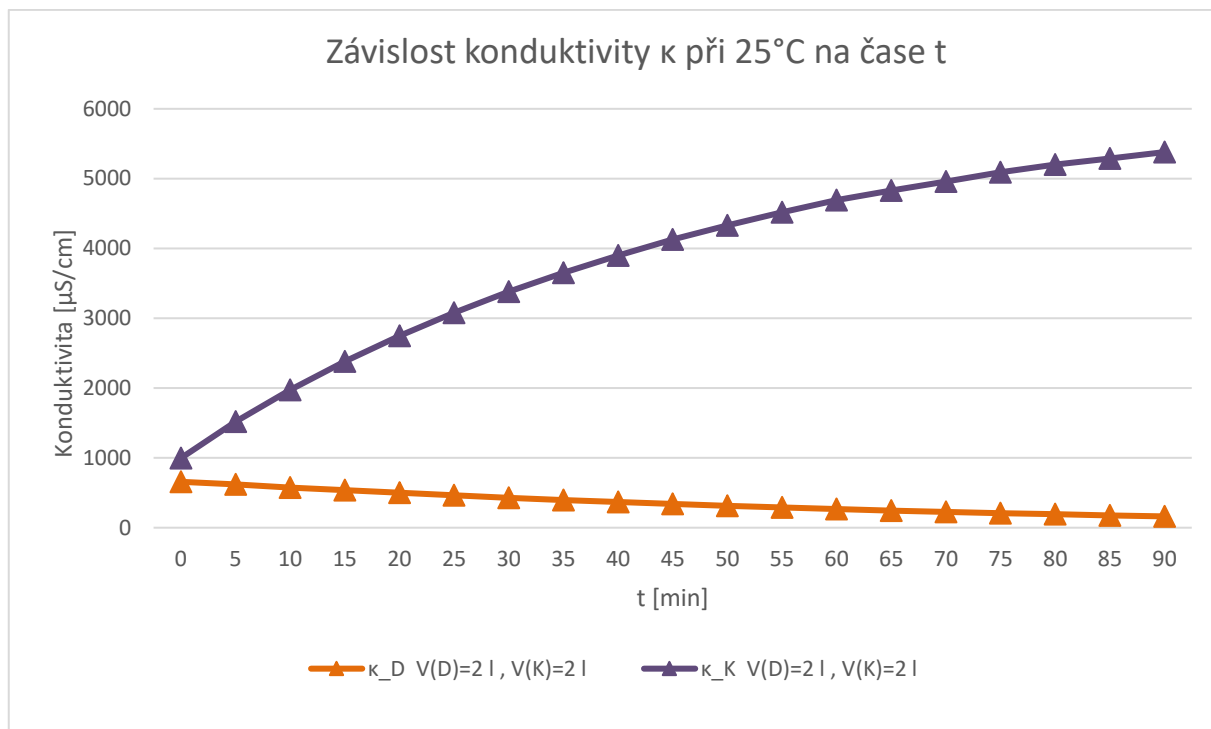
N [párů]	10
U svazek [V]	14
Roztok D	Vzorek Krásné Pole Předvrší
Roztok K	Vzorek Krásné Pole Předvrší
Roztok E	Na ₂ SO ₄
Režim D	BATCH
Režim K	BATCH
Režim E	BATCH

Tabulka 17: Základní hodnoty pro test vzorku Krásné Pole Předvrší V(D) = 7,5 l, V(K) = 0,5 l

	D	K	E
\hat{V} [l/h]	50	50	64
\hat{V} [l/h] konec	50	48	65
κ_0 [mS/cm]	0,677	0,677	
κ_{konec} [mS/cm]	0,149	5,130	
V ₀ [l]	7,5	0,5	0,25
V _{konec} [l]	7,5	0,5	



Obrázek 21: Graf změny proudu v čase pro test vzorku Krásné Pole Předvrší (V(D) = 7,5 l, V(K) = 0,5 l)



Obrázek 22: Graf změny konduktivity diluátu a koncentráту v čase pro test vzorku Krásné Pole Předvrší ($V(D) = 7,5\text{ l}$, $V(K) = 0,5\text{ l}$)

5.2.3 Krásné Pole Branecká

Po vstupní analýze vzorku následovaly elektrodialyzační (ED) testy. Byly provedeny celkem tři, s objemem diluátu 2 l a koncentrátu také 2 l. ED testy proběhly 7. 9. 2017. Informace k testům uvádí Tabulky 18,19,20,21. Změny některých parametrů jsou zpracovány graficky (Obrázky 23, 24.).

Tabulka 18: Základní informace pro testy vzorku Krásné Pole Branecká $V(D) = 2\text{ l}$, $V(K) = 2\text{ l}$

N [párů]	10
U svazek [V]	14
Roztok D	Vzorek Krásné Pole Branecká
Roztok K	Vzorek Krásné Pole Branecká
Roztok E	Na_2SO_4
Režim D	BATCH
Režim K	BATCH
Režim E	BATCH

Tabulka 19: Základní hodnoty pro 1. test vzorku Krásné Pole Branecká $V(D) = 2\text{ l}$, $V(K) = 2\text{ l}$

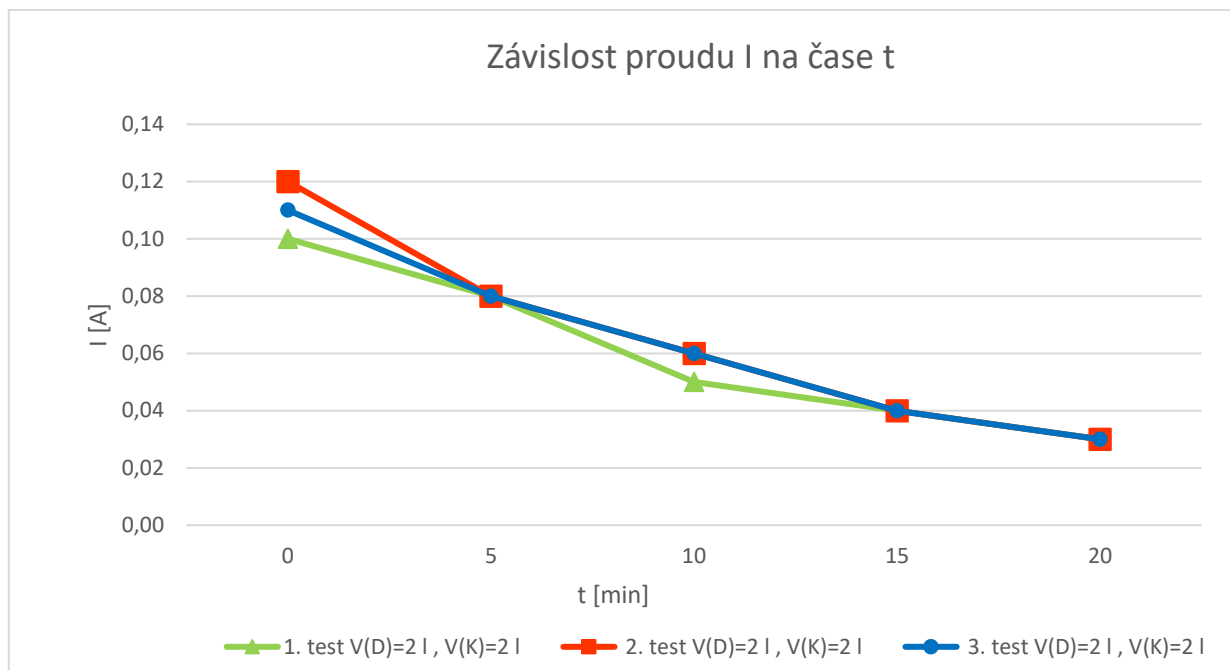
	D	K	E
\tilde{V} [l/h]	36	40	63
\tilde{V} [l/h] konec	39	40	64
κ_0 [mS/cm]	0,553	0,553	
κ_{konec} [mS/cm]	0,21	1,017	
V_0 [l]	2	2	0,25
V_{konec} [l]	2,075	1,925	

Tabulka 20: Základní hodnoty pro 2. test vzorku Krásné Pole Branecká $V(D) = 2\text{ l}$, $V(K) = 2\text{ l}$

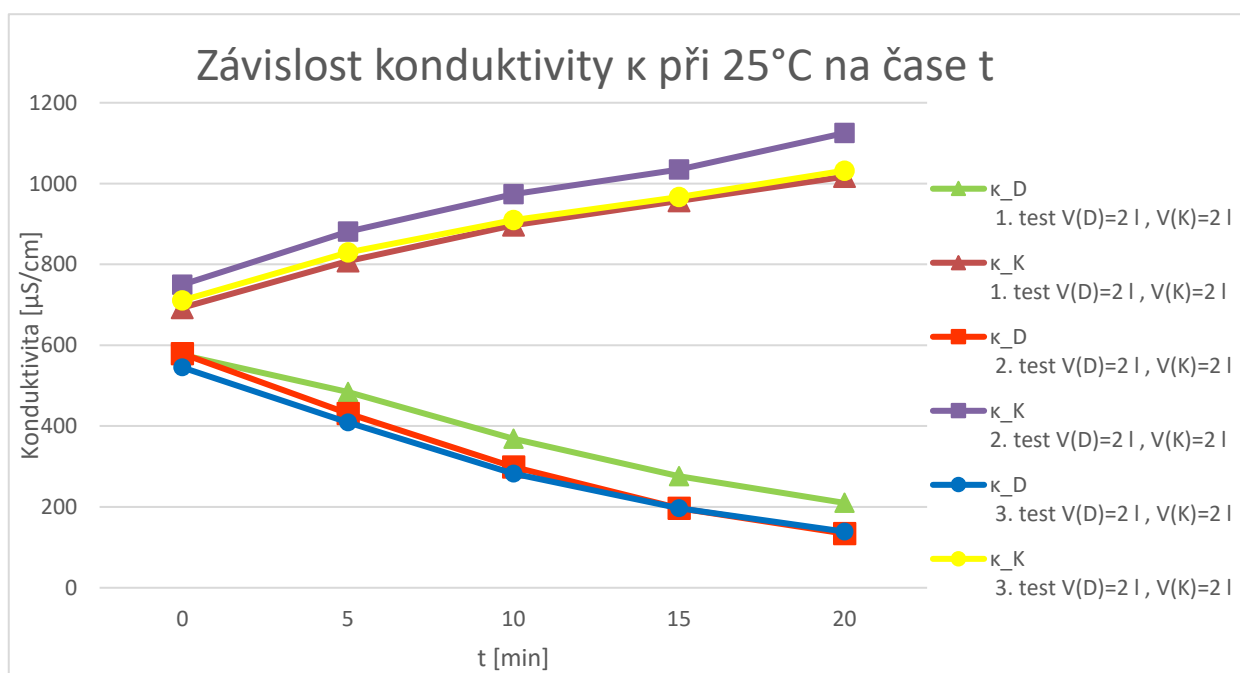
	D	K	E
\tilde{V} [l/h]	55	52	65
\tilde{V} [l/h] konec	55	53	66
κ_0 [mS/cm]	0,553	0,553	
κ_{konec} [mS/cm]	0,134	1,125	
V_0 [l]	2	2	0,25
V_{konec} [l]	1,89	1,95	

Tabulka 21: Základní hodnoty pro 3. test vzorku Krásné Pole Branecká $V(D) = 2\text{ l}$, $V(K) = 2\text{ l}$

	D	K	E
\tilde{V} [l/h]	54	45	65
\tilde{V} [l/h] konec	56	45	65
κ_0 [mS/cm]	0,553	0,553	
κ_{konec} [mS/cm]	0,139	1,032	
V_0 [l]	2	2	0,25
V_{konec} [l]	2	2,01	



Obrázek 23: Graf změny proudu v čase u vzorku Krásné Pole Branecká (testy $V(D) = 2\text{ l}$, $V(K) = 2\text{ l}$)



Obrázek 24: Graf změny konduktivity diluátu a koncentráty při 25 °C v čase u vzorku Krásné Pole Branecká (testy $V(D) = 2\text{ l}$, $V(K) = 2\text{ l}$)

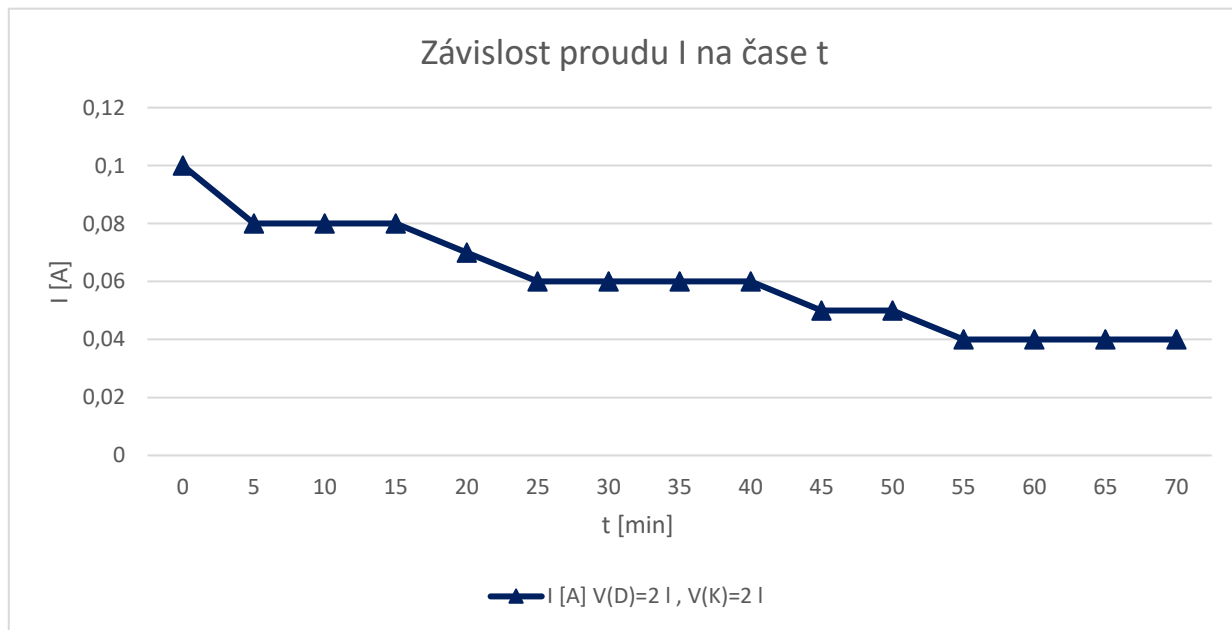
Následně se test opakoval, ovšem tentokrát s použitím peristaltického čerpadla a 7,5 l diluátu a 0,5 l koncentráty. Tento test proběhl 7. 9. 2017. Základní informace potřebné k testu jsou v Tabulce 22 a Tabulce 23, některé parametry jsou zpracovány v grafech (Obrázky 25, 26).

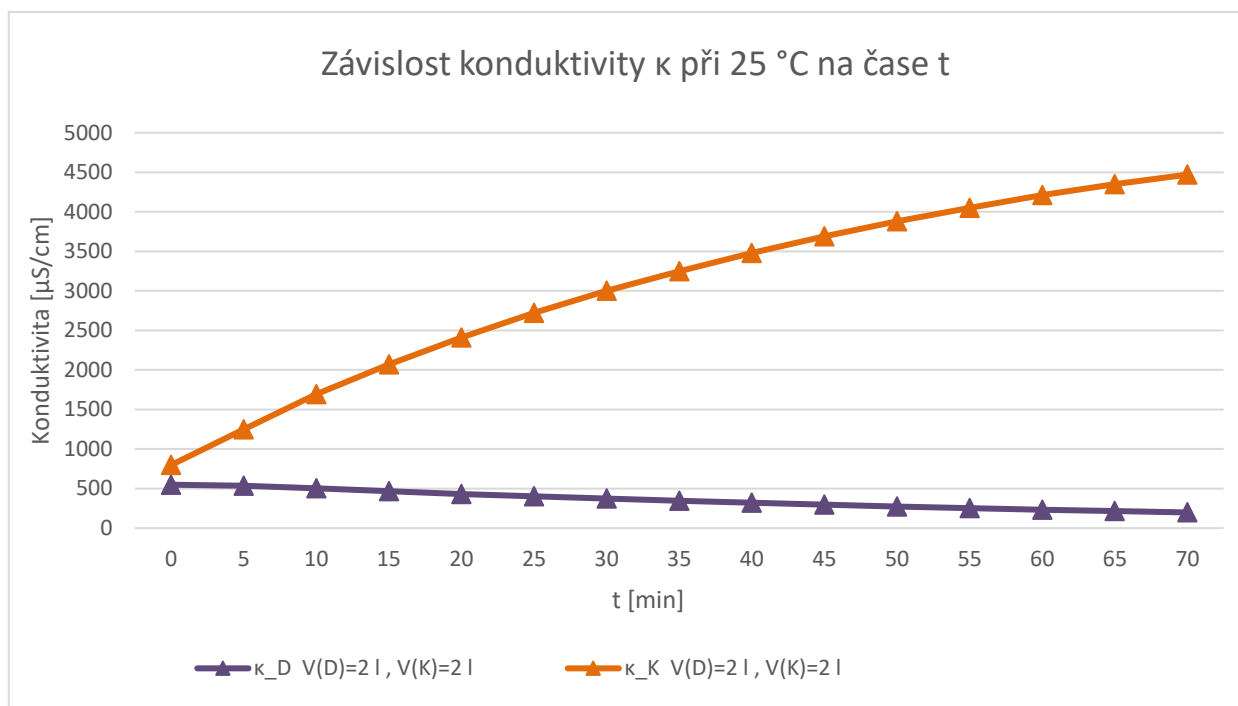
Tabulka 22: Základní informace pro test vzorku Krásné Pole Branecká $V(D) = 7,5 \text{ l}$, $V(K) = 0,5 \text{ l}$

N [párů]	10
U svazek [V]	14
Roztok D	Vzorek Krásné Pole Branecká
Roztok K	Vzorek Krásné Pole Branecká
Roztok E	Na_2SO_4
Režim D	BATCH
Režim K	BATCH
Režim E	BATCH

Tabulka 23: Základní hodnoty pro test vzorku Krásné Pole Branecká $V(D) = 7,5 \text{ l}$, $V(K) = 0,5 \text{ l}$

	D	K	E
$\tilde{V} \text{ [l/h]}$	49	50	64
$\tilde{V} \text{ [l/h] konec}$	50	50	64
$\kappa_0 \text{ [mS/cm]}$	0,553	0,553	
$\kappa_{\text{konec}} \text{ [mS/cm]}$	0,184	4,350	
$V_0 \text{ [l]}$	7,5	0,5	0,25
$V_{\text{konec}} \text{ [l]}$	7,5	0,51	

Obrázek 25: Graf změny proudu v čase pro test vzorku Krásné Pole Branecká ($V(D) = 7,5 \text{ l}$, $V(K) = 0,5 \text{ l}$)



Obrázek 26: Graf změny konduktivity diluátu a koncentráту v čase pro test vzorku Krásné Pole Branecká($V(D) = 7,5\text{ l}$, $V(K) = 0,5\text{ l}$)

6 VÝSLEDKY A DISKUZE

U všech tří testovaných vzorků byly provedeny celkem čtyři testy odsolování. Tři z nich probíhaly za použití 2 l diluátu a 2 l koncentráту a jeden vždy s použitím 7,5 l diluátu a 0,5 l koncentráту. Všechny testy probíhaly s konstantním napětím na svazku - 14 V. Během testů bylo důležité sledovat několik parametrů. Jednalo se o proud, celkové napětí, konduktivitu diluátu i koncentráту, pH diluátu a koncentráту a také teplota diluátu a koncentráту. Během testů, byly všechny sledované parametry zaznamenávány v pětiminutových intervalech. Změny některých parametrů v čase jsou zpracovány graficky. Test byl považován za ukončený v okamžiku, kdy bylo dosaženo největšího stupně odsolení, což odpovídalo poklesu hodnoty proudu pod 0,04 A.

6.1 Vyhodnocení vzorku Nová Bělá

Změny některých parametrů v čase, získané při testech se vzorkem Nová Bělá jsou zobrazeny na Obrázcích 14, 15, 16, 17, 18.

První test s použitím 2 l diluátu a 2 l koncentráту trval po dobu 40 minut. U zbylých dvou testů bylo nejvyššího stupně odsolení dosaženo již za 30 minut. U prvního testu klesla hodnota konduktivity diluátu z 0,610 mS/cm na 0,121 mS/cm a hodnota konduktivity koncentráту vzrostla z 0,610 mS/cm na 1,479 mS/cm. Při druhém testu klesla hodnota diluátu z 0,610 mS/cm na hodnotu 0,150 mS/cm, u koncentráту šlo o zvýšení na 1,166 mS/cm.

Měnila se také velikost celkového napětí a proudu. U prvního testu se u celkového napětí jednalo o pokles z 18,50 V na 18 V, proud se při tomto testu snížil 0,09 A na konečnou hodnotu 0,03 A. U druhého testu hodnota celkového proudu také klesla, z hodnoty 18,40 V na konečnou 17,80 V. Snížení proudu bylo z hodnoty 0,11 A na 0,03 A. Při třetím testu se hodnota celkového napětí změnila o 0,6 V, z původních 18,30 V na 17,70 V. Pokles proudu byl stejný jako u druhého testu, tedy z 0,11 A na 0,03 A.

Posledními sledovanými parametry byla teplota a pH. Při prvním testu došlo k nárůstu teploty diluátu i koncentráту průměrně o 3,5°C. Hodnota pH diluátu se snížila z 6,1 na 4,06 a pH koncentráту se naopak mírně zvýšilo z 6,22 na 6,65. U druhého testu se

teplota diluátu zvýšila z 18 °C na 20,7 °C, u koncentrátu se naopak snížila z 21,2 °C na 20,7 °C. U třetího testu došlo k nárůstu teplot jak diluátu, tak koncentrátu. Teplota se změnila o 2,9 °C, resp. 2,5 °C. pH diluátu kleslo z 6,1 na 4,28, u koncentrátu došlo ke zvýšení pH z 6,27 na 6,58.

V Tabulce 3 jsou uvedeny výsledné hodnoty, získané výstupní analýzou vzorku Nová Bělá. Tabulka 32 uvádí výsledky získané testem s 2 l diluátu a 2 l koncentrátu. Výsledky jsou porovnávány s limitními hodnotami z vyhlášky 252/2004 Sb.

Tabulka 24: Výsledné hodnoty vzorku Nová Bělá (2 l diluátu, 2 l koncentrátu)

Ukazatele	Symbol	Jednotka	Diluát	Koncentrát	Limit	Typ limitu
amonné ionty	NH_4^+	mg/l	1,94	46,75	0,5	MH
celkový fosfor	P	mg/l	1,50	23,15	-	
dusičnany	NO_3^-	mg/l	3,70	92,00	50	NMH
dusitany	NO_2	mg/l	4,10	112,00	0,5	NMH
draslík	K	mg/l	1,93	21,20	-	
hliník	Al	mg/l	0,00	0,00	0,2	MH
hořčík	Mg	mg/l	0,60	10,20	10	MH
chem.spotřeba kyslíku Mn	CHSK Mn	mg/l	1,38	38,60	10	MH
chloridy	Cl^-	mg/l	4,61	73,74	100	MH
konduktivita	K	mS/m	11,30	152,20	125	MH
mangan	Mn	mg/l	<0,02	0,02	0,05	MH
pH		pH	5,32	6,70	6,5 - 9,5	MH
sírany	SO_4^{2-}	mg/l	22,00	200,00	250	MH
sodík	Na	mg/l	10,40	223,00	200	MH
vápník	Ca	mg/l	0,33	12,50	40 - 80	DH
vápník + hořčík	Ca + Mg	mmol/l	-	-	2 - 3,5	DH
zákal		ZF	1,42	0,28	5	MH
železo	Fe	mg/l	0,04	0,06	0,20	MH
teplota	T	°C	22,8	22,7	8 - 12	DH

V grafech na Obrázcích 17, 18 jsou zobrazeny změny některých parametrů v čase při ED testu s 7,5 l diluátu a 0,5 l koncentrátu. Celý test trval 95 minut. Za tu dobu se hodnota proudu snížila z 0,12 A na 0,04 A. Snížila se také hodnota celkového proudu, z počátečních 16,5 V na konečných 15,8 V. Vodivost diluátu se snížila z 0,610 mS/cm na

0,117 mS/cm. U koncentrátu se vodivost naopak zvýšila z původních 0,610 mS/cm na 5,650 mS/cm.

pH diluátu se snížilo a to z 6,18 na 4,82. U koncentrátu došlo ke zvýšení pH z 6,62 na 8,41. Během celého testu došlo ke zvýšení teploty diluátu o 1,4 °C a koncentrátu o 1,8 °C.

Tabulka 25: Výsledné hodnoty vzorku Nová Bělá (7,5 l diluátu, 0,5 l koncentrátu)

Ukazatele	Symbol	Jednotka	Diluát	Koncentrát	Limit	Typ limitu
amonné ionty	NH ₄ ⁺	mg/l	0,24	30,00	0,5	MH
celkový fosfor	P	mg/l	0,09	0,09	-	
dusičnany	NO ₃ ⁻	mg/l	7,60	460,00	50	NMH
dusitany	NO ₂	mg/l	0,00	1,00	0,5	NMH
draslík	K	mg/l	1,58	45,90	-	
hliník	Al	mg/l	0,00	0,00	0,2	MH
hořčík	Mg	mg/l	1,49	99,00	10	MH
chem.spotřeba kyslíku Mn	CHSK Mn	mg/l	0,09	4,16	10	MH
chloridy	Cl ⁻	mg/l	6,38	424,55	100	MH
konduktivita	K	mS/m	11,70	537,00	125	MH
mangan	Mn	mg/l	<0,02	0,03	0,05	MH
pH		pH	6,60	7,68	6,5 - 9,5	MH
sírany	SO ₄ ²⁻	mg/l	20,00	900,00	250	MH
sodík	Na	mg/l	6,33	469,00	200	MH
vápník	Ca	mg/l	7,01	638,00	40 - 80	DH
vápník + hořčík	Ca + Mg	mmol/l	-	-	2 - 3,5	DH
zákal		ZF	0,22	0,55	5	MH
železo	Fe	mg/l	<0,03	<0,03	0,20	MH
teplota	T	°C	22,4	22,6	8 - 12	DH

Vstupní analýzou vzorku (viz Tabulka 3) bylo zjištěno překročení hodnoty koncentrace hořčíku a dusičnanů. Koncentrace hořčíku po vstupní analýze ve vzorku byla 10,2 mg/l. Z tabulek č. 24 a 25 vyplývá, že po elektrodialýze se koncentrace hořčíku snížila a odpovídá stanovenému limitu, který je 10 mg/l. Testem s 2 l diluátu a 2 l koncentrátu bylo docíleno snížení na 0,6 mg/l, testem s 7,5 l diluátu a 0,5 l koncentrátu na 1,49 mg/l. Limit odpovídající dusičnanům v pitné vodě je 50 mg/l. Koncentrace dusičnanů ve vzorku byla vyšší a to 58,8 mg/l. Po testu s objemem 2 l diluátu i koncentrátu byla koncentrace snížena na 3,70 mg/l, o 93,7 %, testem s 7,5 l diluátu a 0,5 l koncentrátu se

podařilo koncentraci dusičnanů snížit na 11,28 mg/l, o 80,8 %. Testem ED ovšem došlo v obou případech ke zvýšení koncentrace dusitanů a amonných iontů, které ve vstupní analýze odpovídaly limitům.

6.2 Vyhodnocení vzorku Krásné Pole Předvrší

Všechny tři testy s 2 l diluátu a 2 l koncentrátu druhého vzorku – Krásné Pole Předvrší trvaly 20 minut. Během prvního testu klesla hodnota celkového napětí o 0,5 V, z 16,80 V na 16,30 V. Hodnota proudu klesla během testu přesně o 0,1 A, z původních 0,13 A na konečných 0,03 A. U druhého testu se hodnota celkového napětí změnila z 17 V na 16,4 V a hodnota proudu z 0,13 A na 0,03 A. Při třetím testu byly změny celkového napětí a proudu stejné jako při prvním, tzn. hodnota klesla z 16,8 V na 16,3 V, resp. z 0,13 A na 0,03 A. Změny proudu v čase u všech třech testů jsou zobrazeny na Obrázku 19.

Dále byly při testu sledovány hodnoty vodivosti diluátu i koncentrátu. U prvního testu klesla vodivost diluátu z 0,677 mS/cm na 0,172 mS/cm. Vodivost koncentrátu se naopak zvýšila na konečných 1,134 mS/cm. Při druhém testu byla zaznamenána změna vodivosti z původních 0,677 mS/cm na 0,174 mS/cm u diluátu a z 0,677 mS/cm na 1,129 mS/cm u koncentrátu. Z naměřených hodnot u třetího testu vyplývá, že se konduktivita diluátu snížila na 0,170 mS/cm a konduktivita koncentrátu se naopak zvýšila na konečných 1,136 mS/cm. Průběh změn vodivosti diluátu i koncentrátu v čase u všech třech testů zobrazuje Obrázek 20.

Teplota diluátu a koncentrátu se během prvního testu nijak závažně nezměnila. Na začátku testu byla naměřena teplota diluátu 22,9 °C, teplota na konci testu klesla na 22,8 °C. U koncentrátu byla změna teploty větší. Z původní teploty 22,9 °C vzrostla na konečných 23,5 °C. Ani změna hodnot pH nebyla při tomto testu nijak závažná. pH diluátu bylo na začátku testu 7,29 a na konci 6,60. pH koncentrátu se změnilo s 7,54 na konečných 7,75. Na začátku druhého testu byly teploty diluátu i koncentrátu stejné, 23,0 °C. Teplota diluátu poté klesla na konečných 22,6 °C a teplota koncentrátu vzrostla na 23,6 °C. pH diluátu kleslo z 7,40 na 6,63, pH koncentrátu se zvýšilo z 7,78 na 8,04. Při třetím testu byly počáteční teploty diluátu a koncentrátu 22,8 °C resp. 22,7 °C. Na konci testu se teplota diluátu zvýšila o 0,2 °C na 23,0 °C a teplota koncentrátu vzrostla

na 23,5 °C. Hodnota pH diluátu se snížila z 7,26 na 6,63, u koncentrátu se naopak zvýšila z 7,82 na 8,33.

V Tabulce 26 jsou uvedeny výsledky získané výstupní analýzou vzorku Krásné Pole Předvrší.

Tabulka 26: Výsledné hodnoty vzorku Krásné Pole Předvrší (2 l diluátu, 2 l koncentrátu)

Ukazatele	Symbol	Jednotka	Diluát	Koncentrát	Limit	Typ limitu
amonné ionty	NH_4^+	mg/l	0,12	0,43	0,5	MH
celkový fosfor	P	mg/l	0,11	0,60	-	
dusičnany	NO_3^-	mg/l	10,50	105,00	50	NMH
dusitany	NO_2	mg/l	0,00	0,80	0,5	NMH
draslík	K	mg/l	2,06	15,10	-	
hliník	Al	mg/l	0,00	0,00	0,2	MH
hořčík	Mg	mg/l	2,26	13,20	10	MH
chem.spotřeba kyslíku Mn	CHSK Mn	mg/l	0,44	2,13	10	MH
chloridy	Cl^-	mg/l	4,25	76,05	100	MH
konduktivita	κ	mS/m	13,60	116,80	125	MH
mangan	Mn	mg/l	<0,02	<0,02	0,05	MH
pH		pH	6,06	7,49	6,5 - 9,5	MH
sírany	SO_4^{2-}	mg/l	17,00	100,00	250	MH
sodík	Na	mg/l	12,50	167,00	200	MH
vápník	Ca	mg/l	30,80	96,00	40 - 80	DH
vápník + hořčík	Ca + Mg	mmol/l	-	-	2 - 3,5	DH
zákal		ZF	0,62	0,70	5	MH
železo	Fe	mg/l	0,04	0,04	0,20	MH
teplota	t	°C	22,5	22,6	8 - 12	DH

Ze získaných výsledků vyplývá, že testy s použitím 2 l diluátu i koncentrátu došlo ke snížení hodnoty koncentrace dusičnanů, které byly ve vstupní analýze naměřeny jako zvýšené. Koncentraci dusičnanů ve vzorku se podařilo snížit z 77,60 mg/l na konečných 10,50 mg/l. Je tedy splněna nejvyšší mezní hodnota, která je stanovena na 50 mg/l. Účinnost procesu odstranění dusičnanů je 83,8 %.

Dále byl vzorek podroben odsolovacímu testu s použitím 7,5 l diluátu a 0,5 l koncentrátu. Změny některých parametrů v čase při tomto testu jsou zobrazeny na Obrázcích 21, 22.

Nejvyššího stupně odsolení došlo v po 90 minutách odsolování. Během této doby klesla hodnota celkového napětí o 0,5 V, z původních 16,60 V na 16,10 V. Hodnota proudu byla na začátku testu 0,12 A, která klesla na konečných 0,04 A.

Hodnota vodivosti diluátu se snížila z 0,677 mS/cm na 0,149 mS/cm, vodivost koncentrátu se naopak zvýšila na 5,130 mS/cm. Během testu došlo ke zvýšení obou teplot. Teplota diluátu byla na začátku testu 23,1 °C, na konci pak 24,6 °C. U koncentrátu se teplota zvýšila z 23,7 °C na 25,1 °C. Naopak došlo k poklesu hodnot pH. Z původní hodnoty 7,65 u diluátu došlo ke snížení na 6,91. Počáteční hodnota pH koncentrátu byla 8,31, během testu klesla na 7,98.

V následující tabulce (Tabulka 4) jsou uvedeny konečné hodnoty pro test s 7,5 l diluátu a 0,5 l koncentrátu, získané výstupní analýzou.

Tabulka 27: Výsledné hodnoty vzorku Krásné Pole Předvrší (7,5 l diluátu, 0,5 l koncentrátu)

Ukazatele	Symbol	Jednotka	Diluát	Koncentrát	Limit	Typ limitu
amonné ionty	NH_4^+	mg/l	0,15	7,50	0,5	MH
celkový fosfor	P	mg/l	0,11	0,11	-	
dusičnany	NO_3^-	mg/l	12,60	640,00	50	NMH
dusitany	NO_2	mg/l	0,01	0,45	0,5	NMH
draslík	K	mg/l	2,70	73,70	-	
hliník	Al	mg/l	0,00	0,00	0,2	MH
hořčík	Mg	mg/l	2,70	104,00	10	MH
chem.spotřeba kyslíku Mn	CHSK Mn	mg/l	0,60	3,43	10	MH
chloridy	Cl^-	mg/l	4,08	368,53	100	MH
konduktivita	κ	mS/m	14,90	513,00	125	MH
mangan	Mn	mg/l	<0,02	0,02	0,05	MH
pH		pH	6,70	7,59	6,5 - 9,5	MH
sírany	SO_4^{2-}	mg/l	22,00	800,00	250	MH
sodík	Na	mg/l	13,60	520,00	200	MH
vápník	Ca	mg/l	25,70	550,00	40 - 80	DH
vápník + hořčík	Ca + Mg	mmol/l	-	-	2 - 3,5	DH
zákal		ZF	0,35	1,06	5	MH
železo	Fe	mg/l	0,15	<0,02	0,20	MH
teplota	t	°C	22,6	22,20	8 - 12	DH

Z hodnot v Tabulce 27 vyplývá, že i tento test lze považovat za úspěšný. Všechny hodnoty jsou nižší, než je stanovený limit. Došlo tedy také k poklesu koncentrace dusičnanů ve vzorku. Z 77,60 mg/l na 12,60 mg/l. Účinnost procesu odstraňování dusičnanů je 86,5 %.

6.3 Vyhodnocení vzorku Krásné Pole Branecká

Také vzorek Krásné Pole Branecká byl podroben třem testům odsolování s použitým objemem diluátu a koncentrátu 2 l. Nejvyššího stupně odsolení bylo dosaženo do 20 minut. Výjimkou byl první test, který trval byl o dvě minuty kratší. Během všech testů došlo k poklesu celkového napětí i proudu. Při prvním testu celkové napětí kleslo z 18,10 V na 17,70 V. Proud se změnil o 0,07 A z 0,10 A na konečných 0,03 A. Při druhém testu kleslo celkové napětí z 16,40 V na 16,30 V a proud se změnil z 0,12 A na 0,03 A. U třetího testu byl naměřen pokles celkového napětí z 16,60 V na 16,40 V a proudu z 0,11 A na 0,03 A.

Jako u všech předchozích testů docházelo k poklesu hodnot vodivosti diluátu a naopak k růstu vodivosti koncentrátu. U prvního testu byla počáteční hodnota vodivosti diluátu 0,553 mS/cm, která klesla na 0,210 mS/cm. Vodivost koncentrátu vzrostla z 0,553 mS/cm na 1,017 mS/cm. Při druhém testu klesla hodnota vodivosti na 0,134 mS/cm. U vodivosti koncentrátu došlo ke zvýšení na konečných 1,125 mS/cm. Hodnota vodivosti diluátu se při třetím testu změnila z 0,533 mS/cm na 0,139 mS/cm, u koncentrátu došlo ke zvýšení na 1,032 mS/cm.

Ani při odsolování tohoto vzorku nedocházelo k výraznějším změnám teploty. Při prvním testu jsou počáteční hodnoty diluátu i koncentrátu shodné, a to 22,3 °C. Na konci testů byly naměřeny rovněž shodné teploty, tentokrát 23,3 °C. pH diluátu kleslo z 6,42 na 5,44 a pH koncentrátu zase vzrostlo z 6,45 na 6,73.

U druhého testu byly naměřeny počáteční teploty diluátu 22,7 °C a koncentrátu 22,8 °C. U diluátu teplota klesla na konečných 22,5 °C, u koncentrátu došlo k nárůstu teploty na 23,3 °C. Hodnota pH diluátu klesla z 6,80 na 5,92 a u koncentrátu vzrostla z 6,98 na 7,19.

Na počátku třetího testu odsolování byly naměřeny téměř shodné teploty diluátu a koncentrátu. Teplota diluátu (22,7 °C) byla pouze o 0,1 °C vyšší než teplota koncentrátu (22,6 °C). Teplota diluátu se v průběhu testu měnila, ovšem na konci testu byla naměřena zase hodnota 22,7 °C. Teplota koncentrátu se zvýšila o 0,7 °C na 23,3 °C. Počáteční pH diluátu bylo 6,46, během testu kleslo až na hodnotu 5,78. U diluátu došlo k jeho zvýšení, z původní hodnoty 6,74 na konečných 6,86.

V Tabulce 5 jsou uvedeny výsledky výstupní analýzy vzorku Krásné Pole Branecká, které jsou porovnány s limitními hodnotami. Tabulka 28 uvádí výsledné hodnoty získané testem s 2 l diluátu a 2 l koncentrátu.

Tabulka 28: Výsledné hodnoty vzorku Krásné Pole Branecká (2 l diluátu, 2 l koncentrátu)

Ukazatele	Symbol	Jednotka	Diluát	Koncentrát	Limit	Typ limitu
amonné ionty	NH ₄ ⁺	mg/l	0,51	8,40	0,5	MH
celkový fosfor	P	mg/l	0,27	3,65	-	
dusičnany	NO ₃ ⁻	mg/l	11,80	88,00	50	NMH
dusitany	NO ₂	mg/l	0,60	19,00	0,5	NMH
draslík	K	mg/l	1,63	10,50	-	
hliník	Al	mg/l	0,00	0,00	0,2	MH
hořčík	Mg	mg/l	1,44	16,10	10	MH
chem.spotřeba kyslíku Mn	CHSK Mn	mg/l	0,26	7,19	10	MH
chloridy	Cl ⁻	mg/l	4,25	61,33	100	MH
konduktivita	K	mS/m	13,80	104,30	125	MH
mangan	Mn	mg/l	<0,02	0,03	0,05	MH
pH		pH	4,78	7,03	6,5 - 9,5	MH
sírany	SO ₄ ²⁻	mg/l	26,00	100,00	250	MH
sodík	Na	mg/l	10,40	124,00	200	MH
vápník	Ca	mg/l	5,74	81,30	40 – 80	DH
vápník + hořčík	Ca + Mg	mmol/l	-	-	2 - 3,5	DH
vákal		ZF	0,30	1,00	5	MH
železo	Fe	mg/l	0,04	0,03	0,20	MH
teplota	T	°C	22,7	22,7	8 - 12	DH

Provedenými testy bylo dosaženo snížení nadlimitní hodnoty dusičnanů ve zkoumaném vzorku. Po vstupní analýze byla naměřena koncentrace 82,40 mg/l,

výslednou analýzou provedenou po testech odsolování byla zjištěna koncentrace 11,80 mg/l (viz Tabulka 28). Došlo ke snížení koncentrace dusičnanů o 85,7 %.

Poté bylo proveden odsolovací test s objemem diluátu 7,5 l a koncentrátu 0,5 l. Tento test probíhal po dobu 70 minut, byl tudíž ze všech testů s větším objemem diluátu, které byly provedeny, ten nejkratší.

Během testu došlo k očekávanému poklesu celkového napětí i proudu. Celkové napětí postupně klesalo z 16,50 V na 15,80 V a proud klesl z počátečních 0,10 A na 0,04 A, kdy bylo dosaženo nejvyššího stupně odsolení. Změna proudu v čase při tomto testu je znázorněna na Obrázku 26.

Při tomto testu došlo k poklesu hodnoty vodivosti diluátu z 0,553 mS/cm na 0,184 mS/cm a k nárůstu hodnoty vodivosti koncentrátu na 4,350 mS/cm. Na Obrázku 27 lze vidět změny vodivostí v čase, které nastaly během tohoto testu.

Nastalo také zvýšení obou hodnot teploty. Teplota diluátu vzrostla z 23,0 °C na 24,1 °C. Teplota koncentrátu se zvýšila z počátečních 23,5 °C na konečných 24,6 °C. U pH došlo k mírnému poklesu hodnoty diluátu, z 6,71 na 6,68 a navýšení pH koncentrátu. Na začátku testu byla naměřena hodnota 6,92, na konci byla zjištěna hodnota 8,75.

Tabulka 29 uvádí výsledné hodnoty, které byly získány výstupní analýzou provedenou po tomto elektrodialyzačním testu.

Tabulka 29: Výsledné hodnoty vzorku Krásné Pole Branecká (7,5 l diluátu, 0,5 l koncentráty)

Ukazatele	Symbol	Jednotka	Diluát	Koncentrát	Limit	Typ limitu
amonné ionty	NH_4^+	mg/l	0,18	2,50	0,5	MH
celkový fosfor	P	mg/l	0,17	0,15	-	
dusičnany	NO_3^-	mg/l	19,00	470,00	50	NMH
dusitany	NO_2	mg/l	0,01	0,50	0,5	NMH
draslík	K	mg/l	2,26	49,40	-	
hliník	Al	mg/l	0,00	0,00	0,2	MH
hořčík	Mg	mg/l	2,85	77,50	10	MH
chem.spotřeba kyslíku Mn	CHSK Mn	mg/l	0,72	3,30	10	MH
chloridy	Cl^-	mg/l	7,27	336,27	100	MH
konduktivita	κ	mS/m	18,40	435,00	125	MH
mangan	Mn	mg/l	<0,02	0,02	0,05	MH
pH		pH	6,61	7,78	6,5 - 9,5	MH
sírany	SO_4^{2-}	mg/l	29,00	400,00	250	MH
sodík	Na	mg/l	11,80	386,00	200	MH
vápník	Ca	mg/l	15,80	437,00	40 – 80	DH
vápník + hořčík	Ca + Mg	mmol/l	-	-	2 - 3,5	DH
zákal		ZF	0,43	0,59	5	MH
železo	Fe	mg/l	0,05	<0,03	0,20	MH
teplota	T	°C	22,6	22,6	8 – 12	DH

Provedeným testem bylo dosaženo snížení koncentrace dusičnanů, z původních 82,40 mg/l na konečných 19 mg/l. Účinnost tohoto testu byla stanovena na 97,0 %.

7 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo odstranit dusičnany z podzemních vod pomocí procesu elektrodialýzy. K tomuto účelu byly vytipovány celkem tři místa, jejichž podzemní vody vykazovaly nadlimitní množství dusičnanů. Jednalo se o vody z domovních studní.

U každého ze tří vzorků byly provedeny celkem 4 testy. Tři s použitím 4 l vstupní vody a jeden s 8 l vstupní vody. Všechny testy probíhaly v tzv. potenciostatickém režimu, což znamená, že napětí na elektrodialyzačním svazku bylo konstantní, 14 V.

Vstupní analýzou byla nejvyšší hodnota dusičnanů zjištěna u vzorku Krásné Pole Braněcká (82,4 mg/l). Právě u tohoto vzorku byla také vypočtena nejvyšší účinnost procesu odstranění dusičnanů ze všech provedených testů. Účinnost procesu byla 97 %. Naopak nejnižší účinnost procesu odstraňování NO_3^- (80,8 %) byla zjištěna u vzorku Nová Bělá, který po vstupní analýze zároveň vykazoval nejnižší koncentraci dusičnanů (58,8 mg/l).

Z výsledků provedených testů vyplývá, že koncentrace dusičnanů u všech vzorků klesla. Výsledné hodnoty byly porovnávány s limitními hodnotami, které určuje vyhláška č. 252/2004 Sb., která stanovuje hygienické požadavky na pitnou a teplou vodu a četnost a rozsah kontroly pitné vody. Po provedené elektrodialýze splňovaly všechny tři vzorky limitní hodnoty všech stanovených ukazatelů. Koncentrace dusičnanů byla ve všech získaných diuátech nižší než 50 mg/l. Výsledné hodnoty se pohybovaly v rozmezí od 3,70 mg/l do 19 mg/l.

Limitní hodnota pro obsah dusičnanů v kojenecké vodě, kterou uvádí vyhláška č. 275/2004 Sb., o požadavcích na jakost a zdravotní nezávadnost balených vod a o způsobu jejich úpravy je 10 mg/l. Ze získaných diuátů lze za kojeneckou vodu považovat pouze diuáty získané z testů se vzorkem Nová Bělá. Při testu s použitím 4 l vstupní vody byla zjištěna koncentrace dusičnanů v diuátu 3,70 mg/l a při testu s použitím 8 l vstupní vody byla koncentrace dusičnanů 7,60 mg/l.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] PITTER, P. *Hydrochemie*. Vyd. 3., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 1999. ISBN 80-7080-340-1.
- [2] KALIČINSKÁ, Jitka. *Monitorování životního prostředí*. Ostrava: Pavel Klouda, 2006. ISBN 978-80-8636-913-6.
- [3] SHRIMALI, M. a K. P. SINGH. New methods of nitrate removal from water. *Environmental Pollution*. 2001, (112), 351-359.
- [4] Vyhláška č. 252/2004 Sb., kterou se stanoví hygienické požadavky na pitnou a teplou vodu a četnost a rozsah kontroly pitné vody, ze dne 22. 04. 2004, ve znění pozdějších předpisů.
- [5] MEYER, N., W. J. PARKER, P. J. VAN GEEL a M. ADIGA. Development of an electrodeionization process for removal of nitrate from drinking water: Part 1" Single-species testing. *Desalination*. 2005, (175), 153-165.
- [6] ROZANSKA, A., VISNIEWSKI, J.: *ELECTRODIALYSIS – AN INTERESTING SOLUTION TO THE “NITRATE PROBLEM” IN DRINKING WATER*. 2005. 1-5. ISSN 1735 – 6865.
- [7] KOPARAL, A. S. a Ü. B. ÖGÜTVEREN. Removal of nitrate from water by electroreduction and electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials*. 2002, (89), 83–94.
- [8] LACASA, E., P. CANIZARES, C. SÁEZ, F. J. FERNÁNDEZ a M. A. RODRIGO. Removal of nitrates from groundwater by electrocoagulation. *Chemical Engineering Journal*. 2011, (171), 1012–1017.
- [9] ZÁKLADNÍ INFORMACE O NITRÁTOVÉ SMĚRNICI (aktualizace 2018). *Nitrát.cz* [online]. 2018 [cit. 2018-04-14]. Dostupné z: <http://www.nitrát.cz/zakladni-informace-o-nitratove-smernici.html>
- [10] Nitrátová směrnice. *Životní prostředí, eAGRI* [online]. Praha: Ministerstvo životního prostředí, 2018 [cit. 2018-03-24]. Dostupné z: <http://eagri.cz/public/web/mze/zivotni-prostredi/ochrana-vody/nitratova-smernice/>
- [11] Vyhláška č. 262/2012 Sb., o *stanovení zranitelných oblastí a akčním programu*, ze dne 27. 07. 2012, ve znění pozdějších předpisů.
- [12] KODEŠ, Vít, Miroslava SVÁTKOVÁ a Jindřich FREISLEBEN. Dvacet pět let systematického sledování jakosti podzemních vod v České republice. *VTEI*. 2016, 2.(2), 4-10. ISSN 1805-6555.
- [13] Vyhláška č. 5/2011 Sb., o vymezení hydrogeologických rajonů a útvarů podzemních vod, způsobu hodnocení stavu podzemních vod a náležitostech programů zjišťování a hodnocení stavu podzemních vod, ze dne 20. 12. 2010, ve znění pozdějších předpisů.
-

- [14] KOŽÍŠEK, F. Je vodovodní voda vhodná i pro kojence. *SOVAK: Časopis oboru vodovodů a kanalizací*. 2005, (11), 29-31.
- [15] Vyhláška č. 275/2004 Sb., o požadavcích na jakost a zdravotní nezávadnost balených vod a o způsobu jejich úpravy, ze dne 28. 04. 2004, ve znění pozdějších předpisů.
- [16] BANASIAK, L. J., T. W. KRUTTSCHNITT a A. I. SCHÄFER. Desalination using electrodialysis as a function of voltage and salt concentration. *Desalination*. 2007, (205), 38-46.
- [17] JINGJING, B., CHANGSHENG, P., HUIZHEN, X., ABOU - SHADY, A.: Removal of nitrate from groundwater using the technology of electrodialysis and electrodeionization. *Desalination and Water Treatment*. 2010, **2011**(34), 394 - 401. DOI: 10/5004/dwt.2011.2891. ISSN 1944 - 3986.
- [18] MALÝ, J., MALÁ, J. *Chemie a technologie vody*. 2. dopl. vyd. Brno: ARDEC, 2006. ISBN 80-86020-50-9.
- [19] DARBY, J., FOGG, G. E., HOWITT, R., JESSOE, K. K., PETTYGROVE, G. S., QUINN, J. F., VIERS, J. H.: *Drinking Water Treatment for Nitrate*. 2012, (Technical Report 6), 1-198.
- [20] ŘÍHOVÁ AMBROŽOVÁ, Jana, Ivo ČERNÝ, Karel FRANK, et al. *Příručka provozovatele úpravny pitné vody*. Druhé aktualizované a doplněné vydání. Líbeznice: vydalo nakladatelství a vydavatelství Medim, spol. s r.o. pro SOVAK ČR, Sdružení oboru vodovodů a kanalizací ČR, 2012. ISBN 978-80-87140-27-7.
- [21] JELÍNEK, L. a kol.: *Desalinační a separační metody v úpravě vody*. Skripta VŠCHT Praha, 2009, 172 str. ISBN 978-80-7080-705-7.
- [22] JANDA, V. Odstraňování anorganických sloučenin dusíku při úpravě pitné vody. In: *Pitná voda, 2008*. České Budějovice: W&ET Team, 2008, s. 177-188. ISBN 978-80-254-2034-8.
- [23] Membránové procesy. *Vscht.cz* [online]. [cit. 2018-04-14]. Dostupné z: <http://www.vscht.cz/uchi/ped/chi/chi.ii.text.k27.membranove.procesy.pdf>
- [24] *Membránové procesy* [online]. Skripta UP Olomouc [cit. 2018-04-10]. Dostupné z: <http://aplchem.upol.cz/predmety/ZCHT/SKRIPTA/2014/Kapitola9.pdf>.
- [25] MIKULÁŠEK, Petr. *Tlakové membránové procesy*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2013. ISBN 978-80-7080-862-7.
- [26] Reverzní osmóza. *Freshwater.cz* [online]. Jihlava, 2016 [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: <http://www.freshwater.cz/technologie/reverzni-osmoza>
- [27] Základní funkce a princip reverzní osmózy (RO). *TZB-info* [online]. Praha, 2016 [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: <https://voda.tzb-info.cz/vlastnosti-a-zdroje-vody/14589-zakladni-funkce-a-princip-reverzni-osmozy-ro>
-

- [28] Mega a.s. *Technická dokumentace - elektrodialyzační modul ED (R)- Z/ 10-1.0*. Stráž pod Ralskem, 2009.
- [29] NOVÁK, L.: *Elektromembránové procesy*, VŠCHT Praha, 2014, ISBN 978-80-7080-865-8.
- [30] Elektrodialýza. *Vscht.cz* [online]. [cit. 2018-04-14]. Dostupné z: http://uchi.vscht.cz/uploads/pedagogika/labchi/ED_mala-navod.pdf.
- [31] MEGA a. s. 2006. Membránové procesy – elektrodialýza (ED). *MEGA* [online]. [cit. 2018-04-14]. Dostupné z: <http://www.mega.cz/elektrodialyza.html>
- [32] Elektromembránové procesy. *Vscht.cz* [online]. [cit. 2018-04-14]. Dostupné z: http://web.vscht.cz/~paidarm/ACHP/prezentace/ACHP_e5.
- [33] KUMAR, N. S. a S. GOEL. Factors influencing arsenic and nitrate removal from drinking water in a continuous flow electrocoagulation (EC) process. *Journal of Hazardous Materials*. 2010, (173), 528–533.
- [34] What Is Denitrification?. *Fluence* [online]. New York, 016n. 1., 2016 [cit. 2018-04-14]. Dostupné z: <https://www.fluencecorp.com/what-is-denitrification/>
- [35] Y.S. Yildiz, A. Koparal, B. Keskinler, Effect of initial pH and supporting substances by electrocoagulation, *Chem. Eng. J.* 138 (2008) 63.
- [36] M.Y.A. Mollah, P. Morkovsky, J.A.G. Gomes, M. Kesmez, J. Parga, D.L. Cocke, Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation, *J. Hazard. Mater.* 114 (2004) 199–210
- [37] J.Q. Jiang, N. Graham, C. Andre, G.H. Kelsall, N. Brandon, Laboratory study of electro-coagulation-flotation for water treatment, *Water Res.* 36 (2002) 4064–4078.
- [38] PALATÝ, Zdeněk, ed. *Membránové procesy*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2012. ISBN 978-80-7080-808-5.
- [39] VASUDEVAN, S., F. EPRON, J. LAKSHMI, S. RAVICHANDRAN, S. MOHAN a G. SOZHAN. Removal of NO₃⁻ from Drinking Water by Electrocoagulation - An Alternate Approach. *CLEAN - Soil, Air, Water* [online]. 2010, **38**(3), 225-229 [cit. 2018-04-13]. DOI: 10.1002/clen.200900226. ISSN 18630650. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/clen.200900226>
- [40] Jakost surové vody. *VÚV TGM, V.V.I.* [online]. HYDROEKOLOGICKÝ INFORMAČNÍ SYSTÉM VÚV TGM, 2013 [cit. 2018-04-14]. Dostupné z: <https://heis.vuv.cz/data/webmap/datovesady/projekty/jakostsurovevody/default.asp>
- [41] Mapa útvarů podzemních vod. *HEIS VÚV* [online]. [cit. 2018-04-14]. Dostupné z: https://heis.vuv.cz/data/webmap/isapi.dll?map=mp_isvs&TMPL=AJAX_MAIN&IFRAME=1&LEGEND_HIDE=0&QUERY_SELECTION=1&FULLTEXT_CHECKED=1
- [42] *Technologické návody*. VŠB-TUO: Katedra enviromentálního inženýrství
-

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

AAS – atomová absorpční spektrofotometrie

BD – biologická denitrifikace

DH – doporučená hodnota

EC – elektrokoagulace

ED testy – elektrodializační testy

EDI – elektrodeionizace

EHS – Evropské hospodářské společenství

CHSK – chemická spotřeba kyslíku

MH – mezní hodnota

NMH – nejvyšší mezní hodnota

RO – reverzní osmóza

WHO – Světová zdravotnická organizace

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Mapa zranitelných oblastí v ČR k 1. 8. 2012	5
Obrázek 2: Schéma procesu iontové výměny	11
Obrázek 3: A) Silně bazický anex B) anex selektivní na dusičnany	11
Obrázek 4: Princip odstraňování dusičnanů pomocí reverzní osmózy	12
Obrázek 5: Princip procesu reverzní osmózy	13
Obrázek 6: Princip elektrodialýzy	14
Obrázek 7: Membránový svazek	15
Obrázek 8: Schéma elektrodeionizace	17
Obrázek 9: Proces biologické denitrifikace	18
Obrázek 10: Chemický stav podzemních vod v lokalitě Nová Bělá [39]	19
Obrázek 11: Chemický stav podzemních vod v lokalitě Krásné Pole [39]	20
Obrázek 12: Elektrodialyzační jednotka ED(R)-Z/10-1.0 [Bc. Kotalová, 2018]	21
Obrázek 13: Elektrodialyzační modul ED(R)-Z/10-1.0 [Bc. Kotalová, 2018]	22
Obrázek 14: Graf změny proudu v čase u vzorku Nová Bělá (testy V(D) = 2 l, V(K) = 2 l)	30
Obrázek 15: Graf změny konduktivity diluátu κ_D a koncentráty κ_K při 25 °C v čase u vzorku Nová Bělá (testy V(D) = 2 l, V(K) = 2 l)	30
Obrázek 16: Graf změny pH diluátu a koncentráty v čase u vzorku Nová Bělá (testy V(D) = 2 l, V(K) = 2 l)	31
Obrázek 17: Graf změny proudu v čase pro test vzorku Nová Bělá (V(D) = 7,5 l, V(K) = 0,5 l)	32
Obrázek 18: Graf změny konduktivity diluátu κ_D a koncentráty κ_K při 25 °C v čase u vzorku Nová Bělá (testy V(D) = 7,5 l, V(K) = 0,5 l)	33
Obrázek 19: Graf změny proudu na čase u vzorku Krásné Pole Předvrší (testy V(D) = 2 l, V(K) = 2 l)	35
Obrázek 20: Graf změny konduktivity diluátu a koncentráty při 25 °C v čase u vzorku Krásné Pole Předvrší (testy V(D) = 2 l, V(K) = 2 l)	35
Obrázek 21: Graf změny proudu v čase pro test vzorku Krásné Pole Předvrší (V(D) = 7,5 l, V(K) = 0,5 l)	36
Obrázek 22: Graf změny konduktivity diluátu a koncentráty v čase pro test vzorku Krásné Pole Předvrší (V(D) = 7,5 l, V(K) = 0,5 l)	37
Obrázek 23: Graf změny proudu v čase u vzorku Krásné Pole Branecká (testy V(D) = 2 l, V(K) = 2 l)	39
Obrázek 24: Graf změny konduktivity diluátu a koncentráty při 25 °C v čase u vzorku Krásné Pole Branecká (testy V(D) = 2 l, V(K) = 2 l)	39
Obrázek 25: Graf změny proudu v čase pro test vzorku Krásné Pole Branecká (V(D) = 7,5 l, V(K) = 0,5 l)	40
Obrázek 26: Graf změny konduktivity diluátu a koncentráty v čase pro test vzorku Krásné Pole Branecká (V(D) = 7,5 l, V(K) = 0,5 l)	41

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Provozní limity elektrodialyzační jednotky ED(R)-Z/10-1.0	22
Tabulka 2: Charakteristické hodnoty elektrodialyzačního modulu ED(R)-Z/10-1.0	23
Tabulka 3: Hodnoty vstupního rozboru vzorku Nová Bělá	25
Tabulka 4: Vstupní analýza vzorku Krásné Pole Předvrší.....	26
Tabulka 5: Vstupní analýza vzorku Krásné Pole Branecká	27
Tabulka 6: Základní informace pro testy vzorku Nová Bělá V(D) = 2 l, V(K) = 2 l.....	29
Tabulka 7: Základní hodnoty pro 1. test vzorku Nová Bělá V(D) = 2 l, V(K) = 2 l	29
Tabulka 8: Základní hodnoty pro 2. test vzorku Nová Bělá V(D) = 2 l, V(K) = 2 l	29
Tabulka 9: Základní hodnoty pro 3. test vzorku Nová Bělá V(D) = 2 l, V(K) = 2 l	29
Tabulka 10: Základní informace pro test vzorku Nová Bělá (V(D) = 7,5 l, V(K) = 0,5 l)	31
Tabulka 11: Základní hodnoty pro test vzorku Nová Bělá (V(D) = 7,5 l, V(K) = 0,5 l)	32
Tabulka 12: Základní informace pro testy vzorku Krásné Pole Předvrší V(D) = 2 l, V(K) = 2 l	33
Tabulka 13: Základní hodnoty pro 1. test vzorku Krásné Pole Předvrší V(D) = 2 l, V(K) = 2 l	34
Tabulka 14: Základní hodnoty pro 2. test vzorku Krásné Pole Předvrší V(D) = 2 l, V(K) = 2 l	34
Tabulka 15: Základní hodnoty pro 3. test vzorku Krásné Pole Předvrší V(D) = 2 l, V(K) = 2 l	34
Tabulka 16: Základní informace pro test vzorku Krásné Pole Předvrší V(D) = 7,5 l, V(K) = 0,5 l	36
Tabulka 17: Základní hodnoty pro test vzorku Krásné Pole Předvrší V(D) = 7,5 l, V(K) = 0,5 l	36
Tabulka 18: Základní informace pro testy vzorku Krásné Pole Branecká V(D) = 2 l, V(K) = 2 l	37
Tabulka 19: Základní hodnoty pro 1. test vzorku Krásné Pole Branecká V(D) = 2 l, V(K) = 2 l	38
Tabulka 20: Základní hodnoty pro 2. test vzorku Krásné Pole Branecká V(D) = 2 l, V(K) = 2 l	38
Tabulka 21: Základní hodnoty pro 3. test vzorku Krásné Pole Branecká V(D) = 2 l, V(K) = 2 l	38
Tabulka 22: Základní informace pro test vzorku Krásné Pole Branecká V(D) = 7,5 l, V(K) = 0,5 l.....	40
Tabulka 23: Základní hodnoty pro test vzorku Krásné Pole Branecká V(D) = 7,5 l, V(K) = 0,5 l	40
Tabulka 24: Výsledné hodnoty vzorku Nová Bělá (2 l diluátu, 2 l koncentrátu).....	43
Tabulka 25: Výsledné hodnoty vzorku Nová Bělá (7,5 l diluátu, 0,5 l koncentrátu)	44
Tabulka 26: Výsledné hodnoty vzorku Krásné Pole Předvrší (2 l diluátu, 2 l koncentrátu)	46
Tabulka 27: Výsledné hodnoty vzorku Krásné Pole Předvrší (7,5 l diluátu, 0,5 l koncentrátu).....	47
Tabulka 28: Výsledné hodnoty vzorku Krásné Pole Branecká (2 l diluátu, 2 l koncentrátu).....	49
Tabulka 29: Výsledné hodnoty vzorku Krásné Pole Branecká (7,5 l diluátu, 0,5 l koncentrátu)	51
